REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Étude de l'effet de l'orientation du renforcement sur la stabilité d'un talus renforcé.

Présenté par

TAHTAH Fouzia.

YAICHE Nour el houda.

Proposé et Dirigé par

Dr : MENAA Lazazi.

Promotion Juin 2019

REMERCEMENT :

Je remercie avant tout DIEU, le tout puissant, pour m'avoir guidé durant toutes mes années d'études et de m'avoir donné la volonté et le courage pour terminer ce travail.

A l'issue de cette recherche, je tiens à remercier tout particulièrement, mon encadreuse M MENAA Lazazi qui a été disponible et attentive à mes nombreuses questions. Qu'elle puisse trouver ici l'expression de ma grande reconnaissance et mes plus

vifs remerciements pour son engagement, les efforts consentis et le temps qu'elle m'a alloué pour achever mon mémoire.

Je remercie aussi le président et les membres du jury pour m'avoir honoré de leur présence et avoir bien voulu examiné ce modeste travail.

Mes sincères remerciements à tous le personnel de la direction des travaux publics (DTP) de Médéa. Toute ma gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Mes vifs remerciements aux plus chers aux mondes, ma mère, mes frères, mes sœurs.

Enfin, je remercie vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DEDICACES :

Je dédie ce modeste travail à:

- ***Ma mère G, Fatiha .***
- ***Mon père Ibrahim .***
- ***Ma tante et deuxième maman.***
- ***Mes sœurs et mes frères.***
- ***Toute la famille « YAICHE».***
- ***Tous mes amis intimes .***
- ***A tous ce qui ont aidés de loin ou de prés pour la réalisation de ce mémoire.***

YAICHE , N

DEDICACES :

Je dédie ce modeste travail à:

- ***Ma mère CH, Fadilla .***
- ***Mon père rabah .***
- ***Mes sœurs et mes frères.***
- ***Toute la famille « TAHTAH».***
- ***Tous mes amis intimes.***
- ***A tous ce qui ont aidés de loin ou de prés pour la réalisation de ce mémoire.***
- ***Toute la promotion 2018 /2019.***

TAHTAH , F

LISTE DES FIGURES.

CHAPITRE I:

Figure I-1 : les trios phases des sols.

Figure I-2 : courbe granulométrique.

*Figure I-3 **:** Principe du préchargement pour le contrôle des tassements.*

Figure I-4 : consolidation atmosphérique.

Figure I-5 : Drain filtre.

*Figure I-6 **:** technique de colonne ballastée.*

*Figure 1-7 **:** traitement à la chaux .*

Figure I-8 : Eléctro-osmose.

*Figure I-9 **:** Compactage de surface.*

Figure I-10 :vibro compactage.

Figure I-11: micropieux.

*Figure I-12 **:** Illustration d'un mur de soutènement en BA avec chaise intermédiaire (SANGLERAT, 1983).*

Figure I-13 : Illustration d'un renforcement par mur de soutènement (BENHADOUCHE et NEHAOUA).

Figure I-14 : Les palplanches.

Figure I-15 : Mur de soutènement en gabion

Figure I-16: Exemple de stabilisation d'un talus par tirants d'ancrage.

*Figure I-17 **:** Stabilisation par Clouage.*

*Figure I-18**:**Clouage de pieux (www.syntecingenierie.fr/media/uploads/tables.../4geotechnique.pdf).*

Figure I-19: Schéma de principe de paroi moulée.

Figure I-20: Renforcement par géo synthétique.

Figure I-21: Géogrille tissé.

Figure I-22 : Géocomposite.

*Figure I-23 **:** géotextile non tissé.*

Figure1-24 : Géotextile tissés.

*Figure I-25 **:** Géotextile tricoté.*

*Figure I-26**:** Les différentes fonctions des géotextiles.*

Figure I-27 : Rampes de pyramides (d'après Les bâtisseurs des grandes pyramides, G. Goyon, Pygmalion, 1990).

Figure I- 28 : différentes techniques de soutènement.

*Figure I-29 **:** Panneaux de pleine hauteur.*

*Figure I-30 **:** Panneaux de hauteur partielle.*

*Figure I-31 **:** Panneau incliné préétablie.*

*Figure I-32 **:** Jardinières.*

Figure I-33: Parement cellulaire.

*Figure I-35 **:** Parement treillis soudé en acier.*

Figure I-36: Parement à face enveloppée.

Figure I-37 : Murs avec un parement formé de gabions.

CHAPITRE II:

Figure II-1 : Courbe granulométrique.

Figure II-2 : Réalisation de l'essai de compactage.

Figure II-3: appareil de cisaillement.

*Figure II-4 **:** géotextile horizontale.*

Figure II-5:géotextile vertical.

*Figure II-6 **:** géotextile de 45˚.*

*Figure II-7 **:** courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontale (mm) de 100 kpa .*

*Figure II-8**:**la courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontal de 200kpa.*

*Figure II-9**:**la courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontale de 300 kpa.*

*Figure II-10 **:** des droites de contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale (kpa).*

Figure II-11 : courbe d'ongle de frottement en fonction de teneur en fine (%).

Figure II-12 : courbe de cohésion(Mpa) en fonction de teneur en fine (%).

CHAPITRE III:

Figure III-1: Exemple du menu principal.

Figure III-2: La barre de boutons principale.

Figure III-3: la barre de boutons contextuelle "Données".

Figure III-4: La barre de boutons contextuelle "Phasage/Calculs".

*Figure III-5**:** exemples de représentation graphique de renforcements.*

*Figure III-6 **:** gestion des phases et situations**.***

*Figure III-7 **:** navigateur des phases et situation**s.***

*Figure III-8 **:** définition d'une nappe phréatique*

Figure III-9**:** Organigramme montrent les différentes options de la barre d'outil TALREN4.

Figure III-10: Domaine d'analyse.

*Figure III-11 **:** Cas d'un cercle de rupture sans renforcement.*

Figure III-12 : Cas d'un cercle de rupture avec renforcement horizontal.

Figure III-13 **:** *Cas d'un cercle de rupture avec renforcement vertical.*

Figure III-14 **:** *Cas d'un cercle de rupture avec renforcement incliné 45˚.*

Figure III-15 **:** *Cas d'un cercle de rupture avec renforcement horizontal .*

Figure III-16 : Cas d'un cercle de rupture avec renforcement vertical.

Figure III-17 **:** *Cas d'un cercle de rupture avec renforcement incliné 45˚.*

Figure III-18 : Orientation du renforcement dans le massif du sol (talus).

Figure III-19 : Orientation du renforcement dans le massif du sol (talus).

Figure III-20 : Paramètres de cisaillement déterminés à la boite de cisaillement pour différentes situation.

Figure III-21 : Valeurs de Fs pour différentes situations.

LISTE DES TABLEAUX :

CHAPITRE I :

Tableau I-1 : classification des sols.

CHAPITRE II:

Tableau II-1 : caractéristiques de sable.

Tableau II- 2 : caractéristique de géotextile.

Tableau II-3 **:** classification du sol se base LCPC.

Tableau II-4 : tableau de tamisage.

Tableau II-5 : caractéristique de moule proctor.

Tableau II-6: les valeurs de **φ et** C de chaque cas.

CHAPITRE III :

Tableau III-1 : Valeurs théoriques du coefficient de sécurité.

Tableau III-2**:** Remblai avec renforcement.

Tableau III-3: Caractéristiques du sol.

Tableau III-4 **:** caractéristique de sable sans renforcement.

Tableau III-5 : les caractéristiques de sable après le renforcement horizontal.

Tableau III-6 **:** les caractéristiques de sable après le renforcement vertical.

Tableau III-7 **:** les caractéristiques de sable après le renforcement de 45˚.

Tableau III-8**:** Effet de l'orientation de renforcement sur le coefficient de sécurité.

Tableau III-9**:** Propriétés du géotextile de renforcement.

Tableau III-10: Effet de l'orientation de renforcement sur le coefficient de sécurité.

Tableau III-11 : Synthèse des paramètres de cisaillement pour différentes situations

(A,B et C).

Tableau III-12 **:** Synthèse des valeurs de Fs pour différentes situations (A, B et C).

SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS :

C : Cohésion.

φ : Angle de frottement.

γ : poids volumique.

γ_d : La masse volumique sec.

γ_s : La masse volumique du graines solides.

F_S : Coefficient de sécurité.

ملخص

إنها دراسة حدية (عددية وتجريبية) لتأثير المعلمات المتعلقة بعنصر التسليح (التعزيز) المطبق على كتل التربة (منحدر) وفي استقرارها ، مع العلم أنه قد يكون هناك حل مثالي ل الحصول على كتلة مستقرة بتكلفة أقل ومع مخاطر أقل

Résumé :

Il s'agit d'une étude paramétrique (numérique et expérimentale) de l'effet de paramètres liés aux éléments de renforcement (armature) appliqués pour et dans les massifs de sols pour leur stabilité, sachant qu'il peut exister une solution optimale pour l'obtention d'un massif stable avec un moindre cout et avec un moindre risque.

ABSTRACT:

It is a parametric study (numerical and experimental) of the effect of parameters related to the reinforcement element (reinforcement) applied for and in the soil masses for their stability, knowing that there may be an optimal solution for obtaining a stable mass at a lower cost and with less risk.

Plan de travail :

- INTRODUCTION GENERAIE.
- CHAPITRE N° I : AMELIORATION ET RENFORCEMENT DES SOLS.
- CHAPITRE N°II : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MODE OPERATIORE.
- CHAPITRE N° III : SIMULATION ET ETUDE PARAMETRIQUE.
- CONCLUSION GENERALE.

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Dans le présent mémoire, nous allons essayer de donner un aperçu général stabilité des talus, sa conception, son calcul et sa vérification. Ce problème est ren fréquemment dans la construction des ouvrages géotechniques, tel que les route barrages et les fondations. La rupture d'un talus peut être catastrophique et provoqu pertes en vies humaines ainsi que matérielles considérables,

L'étude d'un talus comporte, outre la reconnaissance du site et l'identificati caractéristiques mécaniques des sols, un calcul à la stabilité aboutissant à la détermi d'un cercle de rupture le long de laquelle le risque de glissement est le plus correspondant à un coefficient de sécurité,

Notre étude principalement sur l'analyse de la stabilité de talus en sable , cette é été établie dans le but de mieux comprendre l'influence de renforcement par géotext ces orientations sur les caractéristiques et la résistance de notre échantillon de sable I BAHBEH vis-à-vis du cisaillement ,L'outil informatique de calcul utilisé est l LALREN 4,

Après une introduction générale notre travail de fin d'étude est constitué d chapitres ; le 1er chapitre, théorique, sur les méthodes de l'améliorations et renforcem sols et des talus ; le 2ème chapitre, pratique, présente les principaux essais et résultat essais géotechniques au laboratoire. Un 3ème chapitre est consacré à une simulation calcul à la stabilité maniant le logiciel TALREN4 . Enfin, l'ensemble des chapitr terminé avec une conclusion générale.

CHAPITRE N° I : AMELIORATION ET RENFORCEMENT DES SOLS.

- **Définition des sols.**
- Le sol est un ensemble des particules minérales naturelles facilement séparé ou réduis en parties et dont la masse totale peut contenir de l'aire de l'eau et matière organique.
- **Classification des sols (sols grenus, sols fins).**

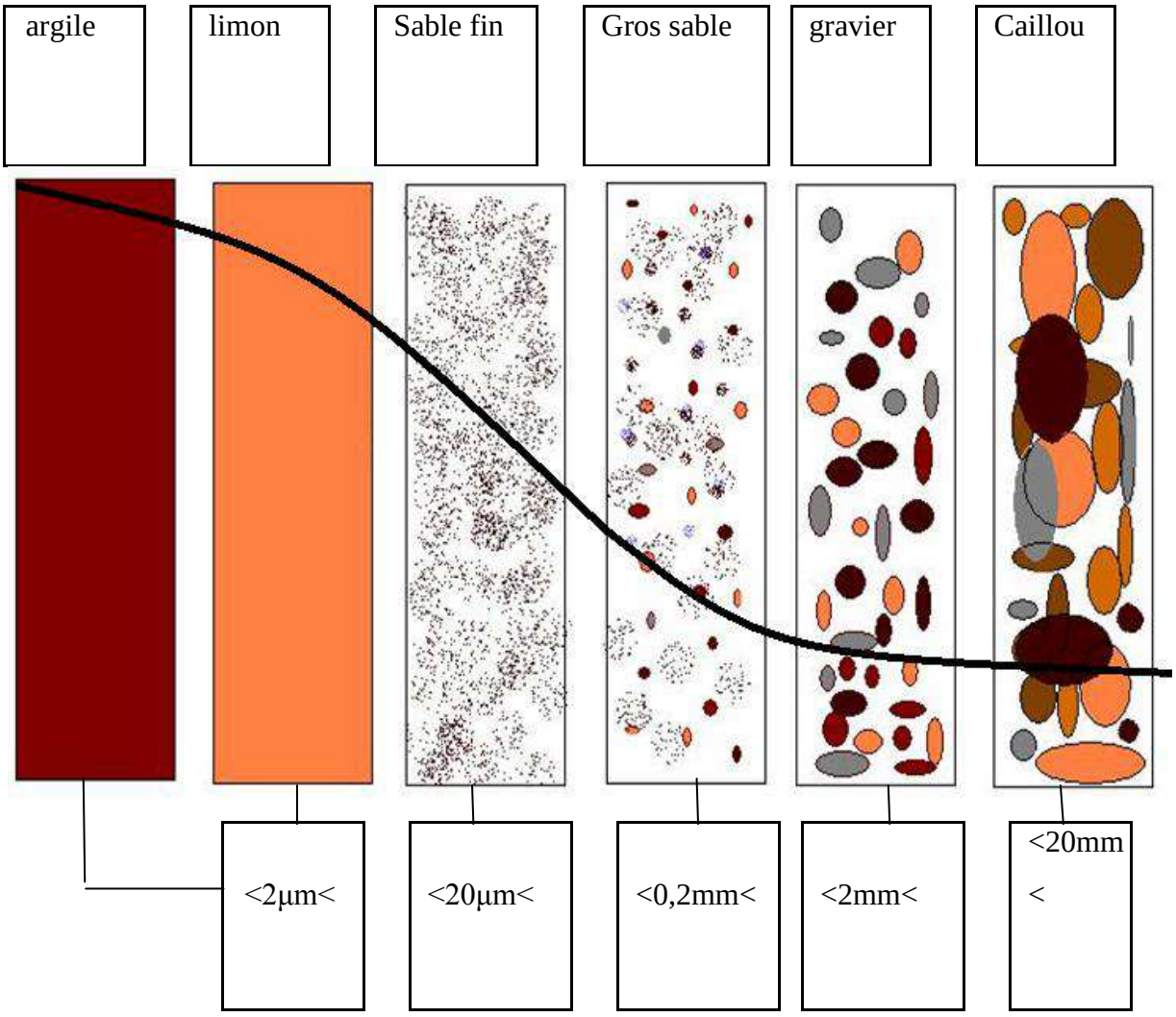


Figure I-2 : courbe granulométrique.

les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformation qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet .

certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes de pilonnage, de congélation ,.

Méthode d'amélioration des sols :

-Amélioration des sols fins par préchargement.

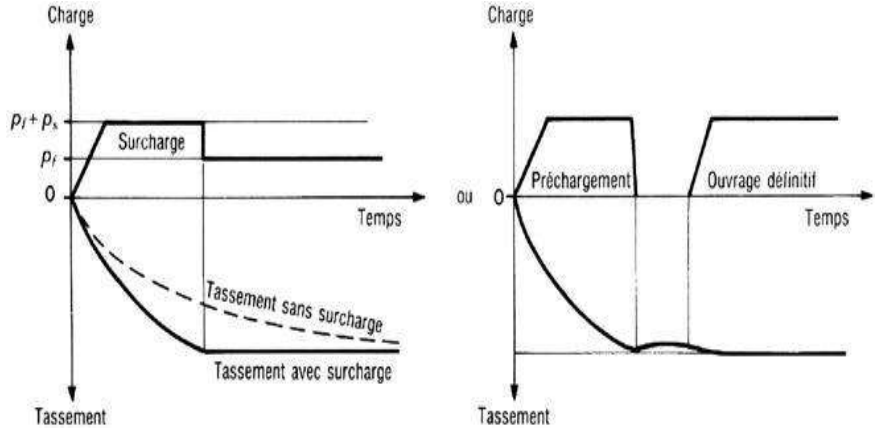


Figure I: Principe du préchargement pour le contrôle des tassements.

Préchargement par consolidation atmospherique.

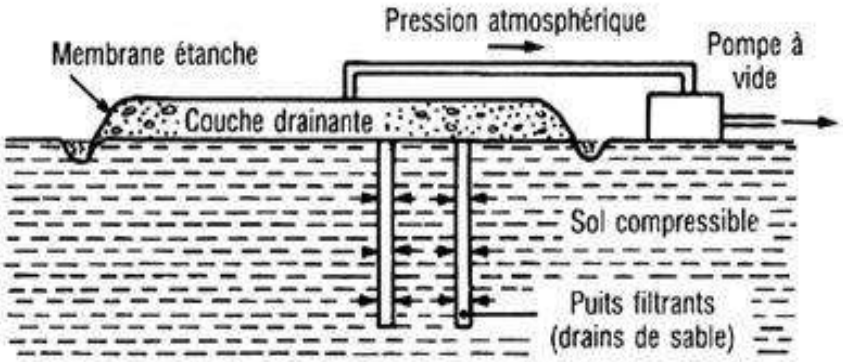


Figure : consolidation atmosphérique.

-Amélioration des sols par drainage.

-Compactage

-Micropieux:

Amélioration des sols fins par renforcement.

1-Renforcement par colonnes ballastées.

2-Renforcement par colonnes de sol traité à la chaux.

3-renforcement par congélation.

4-Renforcement par électrconsolidation

Renforcement des sols.

Les renforcements des sols est particulier de l'amélioration des sols, il recouvre des techniques qui consistent à mettre en place des inclusions résistantes au sein du sol, dans le but d'augmenter ces performance

Méthode des renforcements des talus renforces.

1-Soutènement.

A-Stabilisation par mur de soutènement en béton armé.

B-Renforcement par rideaux de palplanches.

C-Renforcement par gabion .

D-Renforcement par soutènement en TEXSOL

E-Renforcement Par Parois Cloutées.

2 : Renforcement.

A-Tirants d'ancrage.

B-Le clouage.

C-Renforcement Par géosynthétique.(

géogrille, géotextile ou géocomposite)



Figure I -20: Renforcement par géo synthétique

Renforcement par géotextiles. :

Les géotextiles sont des nappes continues de fibres ou filaments tissés, non-tissés, tricotés ou thermo-soudés. Les nappes sont souples et perméables et ressemblent en général à des textiles. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion.

CHAPITR N° II : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MODE OPERATIORE.

Dans ce projet on réalise trois essais de laboratoire :

1-proctor normal

2- analyse granulométrique :

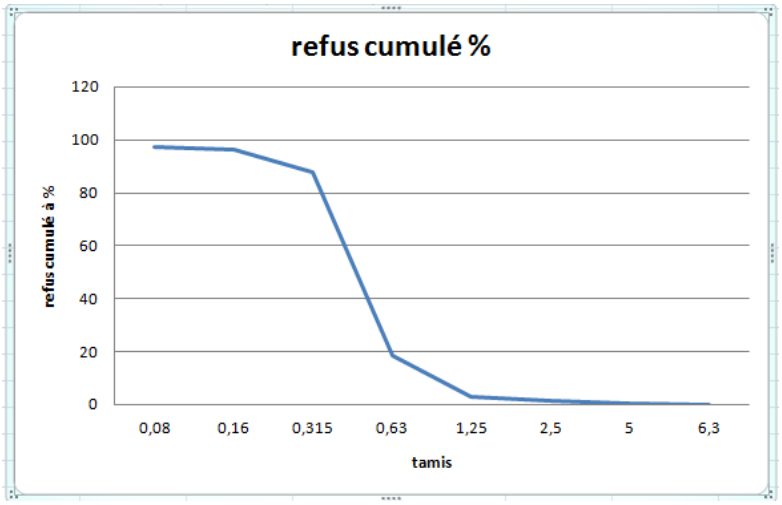


Figure : Courbe granulométrique

3-cisaillement à la boite :

Sable vierge :

Dans ce cas nous utilisant le sable sans le renforcement par la nappe de géotextile sur la boite de cisaillement, cette opération permis de déterminée les caractéristiques mécanique de ce sable.

Cohésion, C (kPa)	Angle de frottement, φ (°)
1,73	35,25

-Sable renforcé :

a- géotextile horizontal.

Dans ce cas la nappe de géotextile (renforcement) est placée dans la boite de cisaillement horizontalement, considérant avec le plan de cisaillement

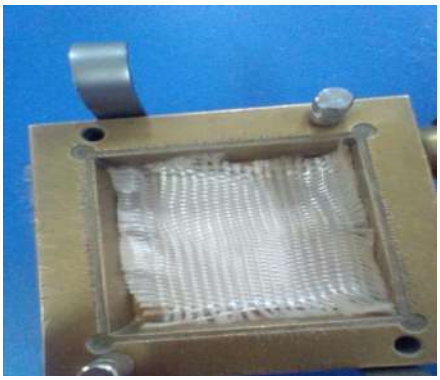


Figure : géotextile horizontale.

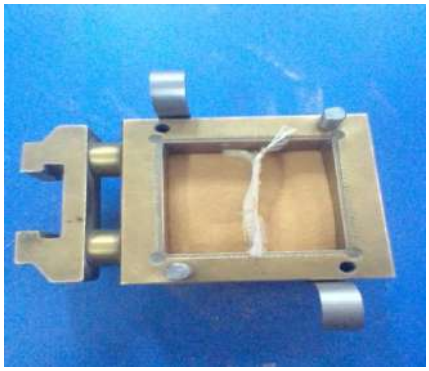


Figure : géotextile vertical.

b-géotextile vertical :

c-géotextile incline de 45˚

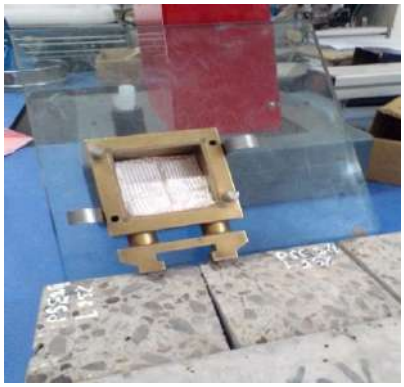


Figure : géotextile de 45˚.

RESULTANT OBTENU :

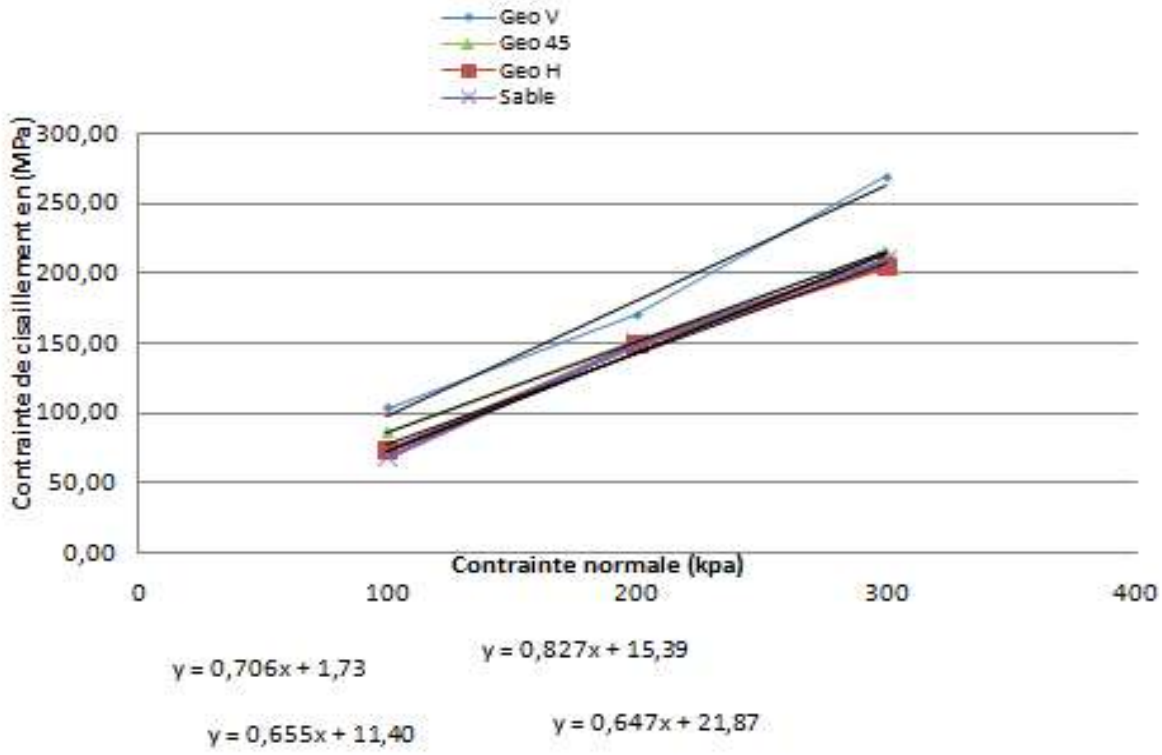


Figure II-10 : droites de contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale (kpa).

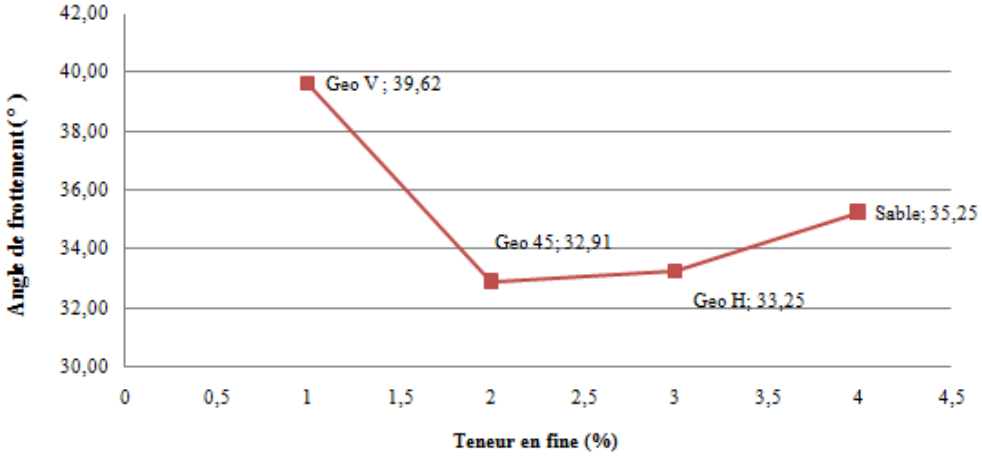


Figure II-11 : courbe d'angle de frottement en fonction de teneur en fine (%).

***Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :**

Dr 50 %				
Fine	**Geo V**	**Geo 45**	**Geo H**	**Sable vierge**
100	103,60	86,31	73,51	68,66
200	170,15	151,85	149,45	150,59
300	269,18	215,73	204,64	210,02
C (kpa)	15,40	21,88	11,40	1,73
Phi (°)	39,62	32,91	33,25	35,25

Tableau : les valeurs de **φ et** C de chaque cas.

CHAPITR N°III : SIMULATION ET ETUDE PARAMETRIQUE .

La vérification à la stabilité au glissement (circulaire) menée à l'aide du logiciel de calcul (TALREN4),

Phase / Type de talus (Méthode Bishop)	Fs		
	Situation A : Talus sans renforcement	Situation B : sol amélioré	Situation C : sol renforcé
Talus sans renforcement	0.92		
Talus renforcée horizontalement		1,64	1,49
Talus renforcée verticalement		1,64	1,52
Talus de renforcement incline de 45°		1,65	1,48

Tableau III-12 : Synthèse des valeurs de Fs pour différentes situations (A. B et C).

L'aboutissement à la conclusion définitive sur la variante optimale à introduire dans le calcul menant à une stabilité réelle des talus renforcés s'avère encore anticipée. Néanmoins, chose certaine que la dépendance orientation du renforcement/Valeur de Fs est nettement claire en comparant la situation A, B et la situation classique. La situation A est la situation sans renforcement (Valeur de Fs, plus faible, égale 0,92).

La situation B paraît un peut grossière puisque elle donne une valeur de Fs exagérée et introduit les données de cisaillement en considérant (virtuellement) le massif renforcement un monolithe de caractéristiques équivalentes améliorés ($C_{am.}$ Et φ_{am})

La situation C, est menée en introduisant les données du sol et du renforcement séparément ; il s'agit d'un calcul classique.

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Les glissements de terrains sont des phénomènes qui menacent leur stabilité et constituent, comme conséquences, un risque pour les infrastructures et la vie humaine. Dans la pratique, ils constituent l'une des préoccupations majeures des ingénieurs géotechniciens.

L'étude a commencé par l'identification et la reconnaissance mécanique d'un sol de faible résistance (sable de dunes -HASSI BAHBAH-) suivie par une étude de sont amélioration par des armatures en géotextile, tenant compte de l'effet de son orientations dans le sol. Cette étude a été menée grâce à des essais de laboratoire au cisaillement à la boite, associés à une analyse granulométrique.

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Dans le présent mémoire, nous allons essayer de donner un aperçu général sur la stabilité des talus , sa conception, son calcul et sa vérification .donc, quel est l'orientation le plus stable de notre éléments de renforcement ?

Ce problème est rencontré fréquemment dans la construction des ouvrages géotechniques, tel que les routes, les barrages et les fondations. La rupture d'un talus peut être catastrophique et provoquer des pertes en vies humaines ainsi que matérielles considérables,

L'étude d'un talus comporte, outre la reconnaissance du site et l'identification des caractéristiques mécaniques des sols, un calcul à la stabilité aboutissant à la détermination d'un cercle de rupture le long de laquelle le risque de glissement est le plus élevé, correspondant à un coefficient de sécurité,

Notre étude principalement sur l'analyse de la stabilité de talus en sable , cette étude a été établie dans le but de mieux comprendre l'influence de renforcement par géotextile est ces orientations sur les caractéristiques et la résistance de notre échantillon de sable HASSI BAHBEH vis-à-vis du cisaillement ,L'outil informatique de calcul utilisé est logiciel LALREN 4,

Après une introduction générale notre travail de fin d'étude est constitué de trois chapitres ; le 1er chapitre, théorique, sur les méthodes de l'améliorations et renforcement du sols et des talus ; le 2ème chapitre, pratique, présente les principaux essais et résultants des essais géotechniques au laboratoire. Un 3ème chapitre est consacré à une simulation et un calcul à la stabilité maniant le logiciel TALREN4 . Enfin, l'ensemble des chapitres est terminé avec une conclusion générale.

I-1-Introduction.

Lorsque la construction d'un ouvrage est implantée sur un terrain constitué d'un sol de mauvaise qualité, en vue d'éviter la solution onéreuse et classique de fondation spéciale, il faut recourir à la technique d'amélioration de sol. Cette dernière, du point de vue coût et délai d'exécution, devra être avantageuse par rapport à toute autre solution de fondation à mettre en ouvre.

Lorsqu'une technique d'amélioration est optée, une vérification serait nécessaire, au préalable, concurrent la faisabilité et exécution selon les conditions géotechniques du projet visé et de la quantification des performances pré dictées pour le sol amélioré.

Cela implique la réalisation de plots d'essais sur une plateforme limitrophe à l'emplacement de l'ouvrage, ce qui pourrait amener de compléter la campagne géotechnique déjà faite. Il y a lieu, donc, de comparer entre les propriétés du sol initial avant et après l'opération d'amélioration, qui s'accompagne de certaines performances qui conduiront à de nouvelles propriétés et caractéristiques du sol initial. Les résultats de ces essais
Servent également à la validation des méthodes de calcul adoptées lors du dimensionnement spécifique à la technique d'amélioration exécutée. [1].

Ce chapitre présent une panoplie de techniques courantes d'amélioration des sols en place du point de vue faisabilité et avantages, exécution, dimensionnement et contrôle de suivi à travers de projet réel.

I-2-Définition des sols.

Le sol est un ensemble des particules minérales naturelles facilement séparé ou réduis en parties et dont la masse totale peut contenir de l'aire de l'eau et graine solide.

Le sol peut être schématisé comme étant composé de trois phases. Une phase solide composée de particules minérales solides, et organiques, une phase liquide, sous différentes formes appelées : eau libre, eau cupulaire et pour finir une phase gazeuse.
La phase solide la phase liquide sont supporter des contraintes importantes. [2].

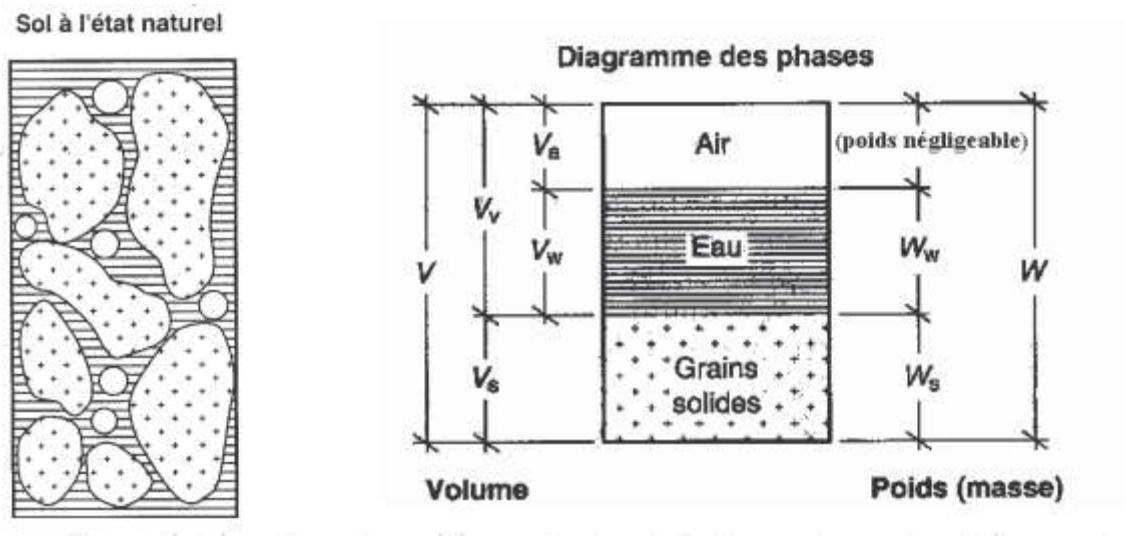


Figure I-1 : les trios phases du sol.

I-3-Classification des sols (sols grenus, sols fins).

Les sols peuvent être classés (en géotechnique) comme :

a)-Blocs, cailloux (fragments de la roche mère) : éboulis de pente, alluvions grossières, moraines 20mm<d<200mm.

b)-Grave (fragment de roche mère) : sédiments détritiques généralement formés de plusieurs minéraux 2mm<d<20mm.

c)-Sables (fragment de roche mère) : sédiment détritique généralement formés d'un seul minéral : 20µm<d<2mm.

d)-Limons (fragment de roche mère) : mélange de très fins de sable, mêles en général à des particules argileuses : 2µm<d<20µm.

-Les argiles (altération physico-chimique de certain minéraux des roches) : particules<2µm. [2].

Sols grenus d>80µm	Sols fins d<80µm
Cailloux, grave, sable	Limon, argile

Tableau I-1 : classification des sols (LCPC).

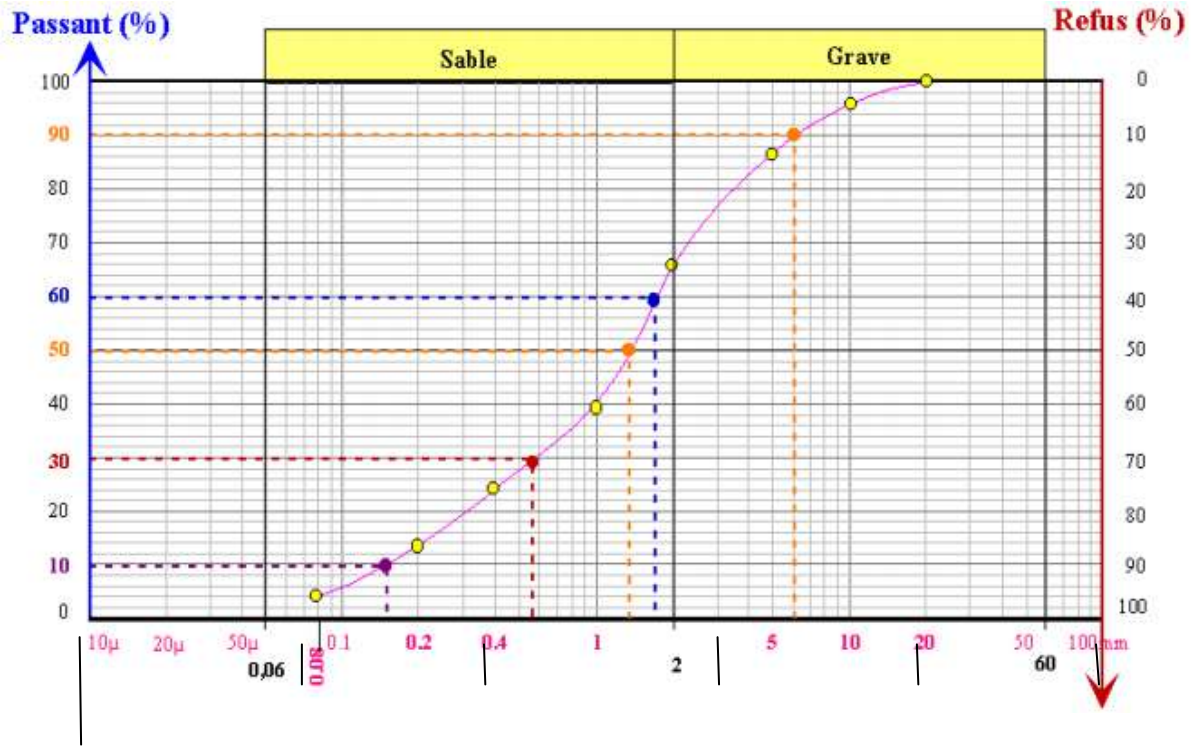


Figure I-2 : courbe granulométrique (LCPC).

I-4-Amélioration des sols.

Les méthodes d'amélioration des soles sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformation s qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet ; certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance , d'autres sont plus récentes , comme les méthodes d'injection , de pilonnage ou de congélation , elles ont connu , depuis une vingtaine d'années , un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.[2].

Le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

Concernant ce traitement on peut spécifier:[3]

I-4-1-Méthode d'amélioration des sols fins.

I-4-1-1-Amélioration des sols fins par préchargement.

Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de

composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement

Le préchargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins.Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fin et surtout argileux. Préchargement, en essayant d'obtenir par avance une partie au moins des déformations de fluage.

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive p_f augmentée éventuellement d'une surcharge p_s qui assure tout ou partie des effets suivants

-Produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de consolidation secondaire ; on peut rendre ainsi le sol traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants ;

-augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol, ce qui peut être utilisé pour une construction par étapes. [2].

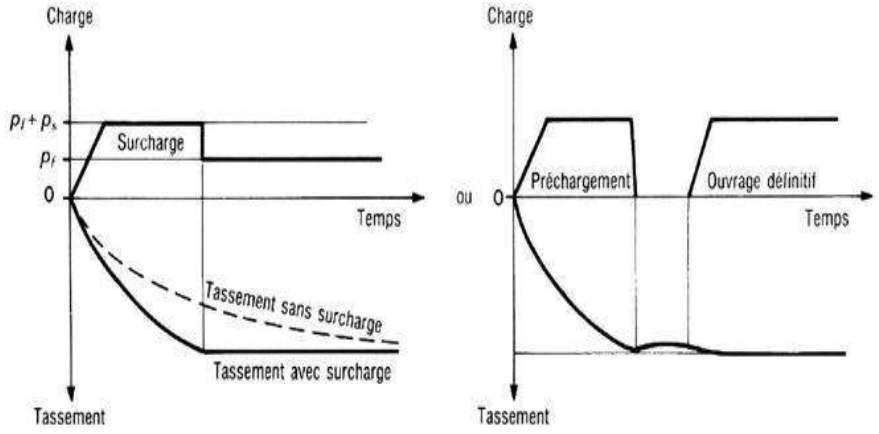


Figure I-3 : Principe du préchargement pour le contrôle des tassements.

I-4-1-2-Préchargement par consolidation atmospherique.

C'est une variante du préchargement par du remblai. Cette méthode est de type isotrope. Elle permet une amélioration des caractéristiques du sol et la rupture et le fluage latéral sont

impossibles. Le terrain est recouvert par une membrane étanche sous laquelle on fait le vide : le sol est ainsi chargé par la pression atmosphérique.

Ce système est toujours couplé a un réseau de drainage vertical et parfois horizontal. [2].

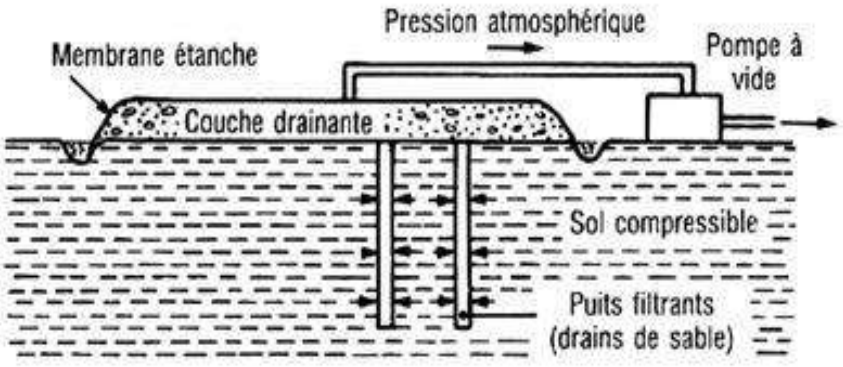


Figure I-4 : consolidation atmosphérique.

I-4-1-4- renforcement des sols :

1-Renforcement par colonnes ballastées.

L'amélioration de sol par colonnes ballastées consiste à mettre en œuvre un «maillage » de colonnes constituées de matériaux ou graveleux, amenant une densification des couche
Il peut être exécuté sur des sols excavés ou des remblais placés en des couches minces. La vibration peut produire une densification additionnelle dans les sols présentant une cohésion. Le compactage provient d'un accroissement de la compacité du sol, et celui-ci est du à un meilleur arrangement des grains et élimination des vides. Des études expérimentales et un compactage appropriés des sols réalisé sur des remblais qui ne tasseront pas ou tasseront très peu. Il ya donc un optimum de compactage à réaliser, c'est cet optimum que laboratoire se Propose de déterminer.

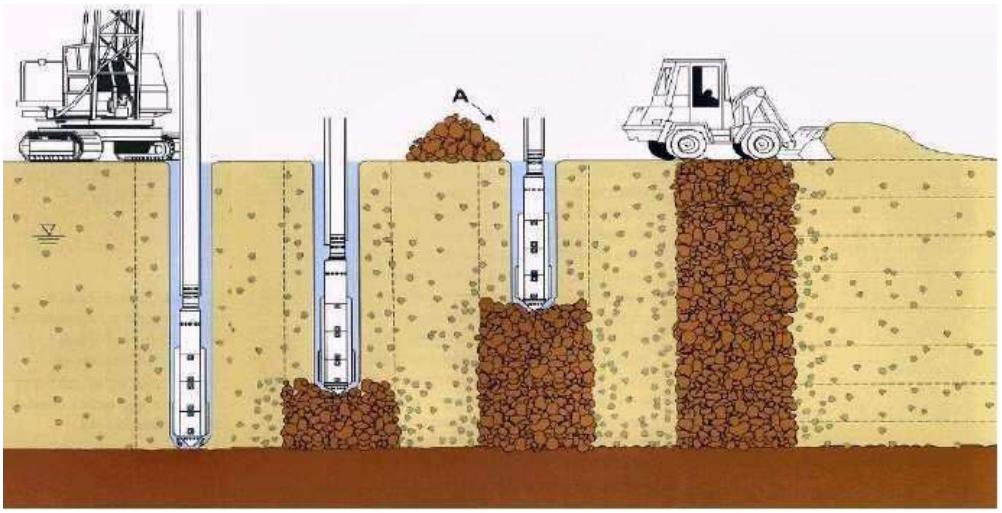


Figure I-6 : technique de colonne ballastée.

2-Renforcement par colonnes de sol traité à la chaux.

La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. L'utilisation de cette technique permet :

- ✓ D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas des substitution des sols médiocres.
- ✓ De diminuer la plasticité et la densité sèche ainsi d'augmenter la résistance du sol et W_{opt}.
- ✓ De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé. [4].



Figure I-7 : traitement à la chaux .

3-renforcement par congélation :

Pour les sols fin : La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsqu'aucune autre solution n'est possible. L'effet de la congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.

Les techniques de refroidissement utilisées reposent, comme pour les sables et les graviers, sur la circulation d'un fluide froid (azote liquide, habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol.

Pour les sols grenus : La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée.

L'augmentation de volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut provoquer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement. [3].

4-Renforcement par électrconsolidation.

L'électro osmose a été initialement mise au point par CASAGRANDE (1947) pour éliminer l'eau contenue dans les argiles actives à faible perméabilité. Cette technique s'est révélée efficace lorsqu'elle a été employée pour introduire un agent chimique dans le sol, soit par dissolution de l'anode, soit par utilisation directe d'un électrolyte.

Cette opération améliore la stabilité du sol soit par modification chimique dans les matériaux argileux par déplacement d'ions, soit par cimentation partielle des vides interstitiels. Cette variante d'électro osmose est connue sous le nom de stabilisation

électrochimique. Le Phénomène d'Electro-osmose sert à appliquer une DDP dans un matériau poreux saturé, l'électrolyte se déplace de l'anode vers la cathode. [3].

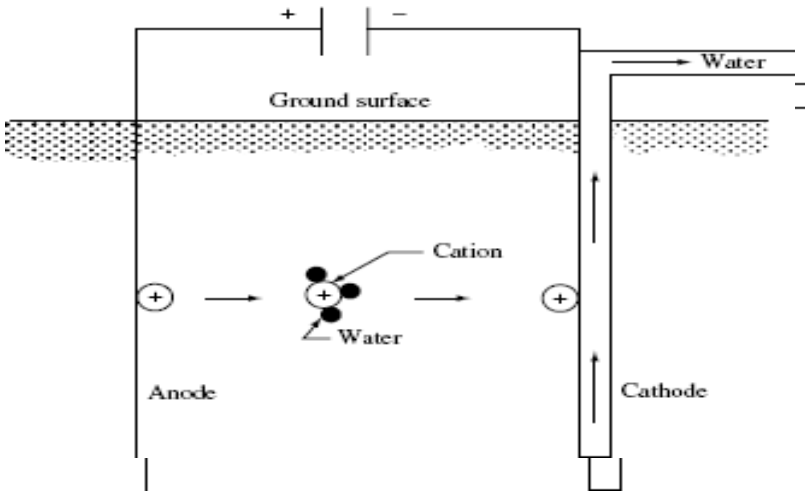


Figure I-8 : Eléctro-osmose.

I-4-2-Méthode d'amélioration des sols grenus.

1-Compactage :

Il peut être exécuté sur des sols excavés ou des remblais placés en des couches minces. La vibration peut produire une densification additionnelle dans les sols présentant une cohésion.

Le compactage provient d'un accroissement de la compacité du sol, et celui-ci est du à un meilleur arrangement des grains et élimination des vides. Des études expérimentales et un compactage appropriés des sols réalisé sur des remblais qui ne tasseront pas ou tasseront très peu. Il ya donc un optimum de compactage à réaliser, c'est cet optimum que laboratoire se propose de déterminer. [3].

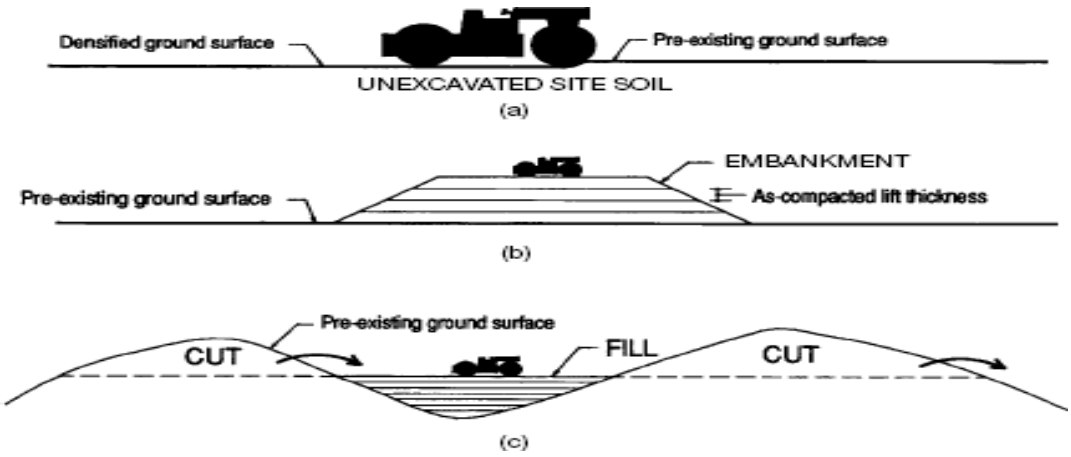


Figure I-9 : Compactage de surface.

Le compactage de surface est utilisé généralement pour une profondeur maximale d'environ 3m. Pour des profondeurs supérieures on utilise les types de compactage profond suivants: Compactage dynamique, Vibro compactage,

1-1-Pilonnage (consolidation dynamique, compactage dynamique).

Les avantages du compactage dynamique sont l'augmentation de la capacité portante, la réduction à la fois du tassement et du potentiel de liquéfaction.

Cette technique a été pratiquée en premier lieu par Ménard au début des années soixante dix (Gambin, 1981). Le compactage dynamique est de même recommandé pour la densification des sols affaissables à structure macroporeuse tels que les loess (Liausu et al, 2001).

Le compactage dynamique est réalisé en deux ou trois étapes.

Lors de la première étape les points de compactage (ou de traitement) sont répartis en un maillage primaire (4m x 4m par exemple) ; en chaque point environ 12 coups sont appliqués de sorte qu'un cratère d'affaissement.

Dans la deuxième étape d'autres points sont répartis en un maillage secondaire plus serré (2m x 2m par exemple), en chaque point on fournit la même énergie de compactage que celle appliquée précédemment (Bjolgerud et Haug, 1983). Ensuite on procède au nivelage final de la surface améliorée à l'aide de compacteurs vibrants, de capacité 10 tonnes.

On prévoit souvent, une sur épaisseur de 10 à 20 cm de la surface traitée qui peut être recouverte d'une couche en gravier concassé. Le contrôle des travaux exige une pénétration minimale en fin de chaque étape de traitement. La pénétration est la profondeur du cratère Résultant du nombre de coups réalisé en chaque point de traitement, cet indice indique que le traitement par compactage dynamique est achevé.

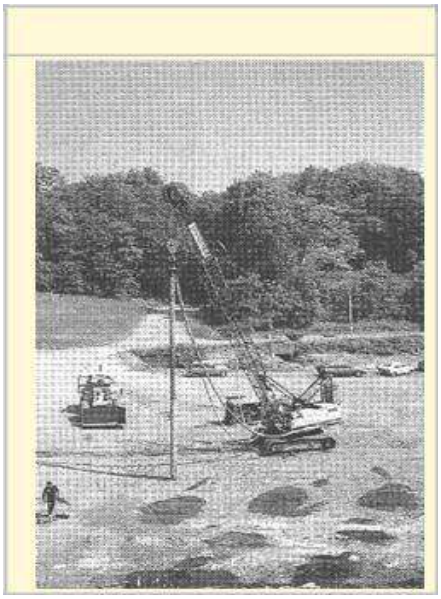


Figure I-10 :vibro compactage.

2-Micropieux:

Ce sont des inclusions coulés en place qui servent de renforts souvent à des ouvrages existants qui ont fait l'objet de dégâts préjudiciables dont l'une des causes est le tassement différentiel dû par exemple à un rabattement de la nappe d'eau.

La technique des micropieux est facilement exécutable par un matériel non encombrant lorsqu'il s'agit de reprises en sous œuvre où les espaces sont souvent limités auprès de l'ouvrage à renforcer.

A l'image d'un essai de chargement de pieu, et afin de justifier la Charge admissible d'un micropieu, on réalise, en vraie grandeur, un d'arrachement par traction. Du fait que de la résistance en compression d'un micro-pieu est négligée (la section de la pointe est très réduite :

Diamètre inférieur à 30 cm), on réalise l'essai d'arrachement par traction en vue d'estimer la résistance par frottement entre le micropieu et le sol.

A partir des résultats de l'essai d'arrachement, on doit vérifier que le micropieu résiste avec une force égale à 1.4 fois la charge de service prévue, sans que la charge de fluage ne soit amorcée. Ainsi on valide la charge admissible calculée du micropieu. [1].



Figure I-11: micropieux.

I-5-Renforcement des sols.

I-5-1-Introduction.

Les renforcements des sols est particulier de l'amélioration des sols, il recouvre des techniques qui consistent à mettre en place des inclusions résistantes au sein du sol, dans le but d'augmenter ces performance.

I-5-2-Méthode des renforcements des talus.

I-5-2-1-les ouvrages de Soutènement.

Les ouvrages de soutènement sont utilisés pour résoudre les problèmes des mouvements des talus en y apportant une résistance mécanique par utilisation d'ouvrages souples ou rigides. [6] .

Les ouvrages souples sont des structures obtenues à partir de gabions, de murs cellulaires, ou de sol renforcé par fils, par armatures synthétiques ou métalliques, par nappes de géotextiles, par grilles métalliques ou synthétiques.

Les ouvrages rigides ne sont pas les mieux adaptés à la stabilisation des glissements de terrain, du fait de leur incompatibilité avec toute déformation ; en outre, le dimensionnement doit prendre en compte les efforts très importants engendrés par le glissement. Lorsque l'ouvrage est correctement ancré et suffisamment résistant vis-à-vis des efforts qui lui sont appliqués, il est fixe. La pratique est de dimensionner l'ouvrage en prenant en compte un effort limite de butée du sol en amont, qui est l'effort maximal apporté par les masses en mouvement (la déformation du sol étant une compression). [7].

1-Stabilisation par mur de soutènement en béton armé.

Les murs de soutènements en béton arme sont équipé d'un dispositif de drainage à l'arrière du voile auquel associé un dispositif d'évaluation des eaux (barbacanes). Ici, des structures de mures plus complexes pourraient être créés pour éviter des terrassements trop importants. On pourrait penser à des chaises intermédiaires.

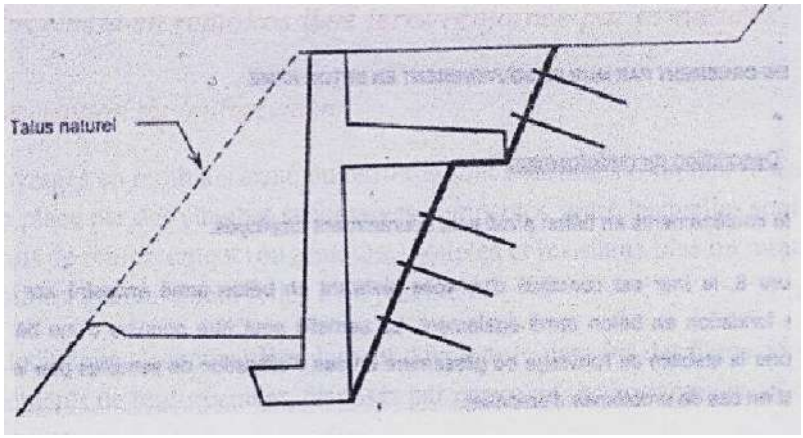


Figure I-12 : Illustration d'un mur de soutènement en BA avec chaise intermédiaire (SANGLERAT, 1983).

La semelle peut être pourvue d'une bêche pour améliorer la stabilité de l'ouvrage au glissement en cas d'utilisation de semelles peu large (notamment en cas de problèmes d'emprise). [7].

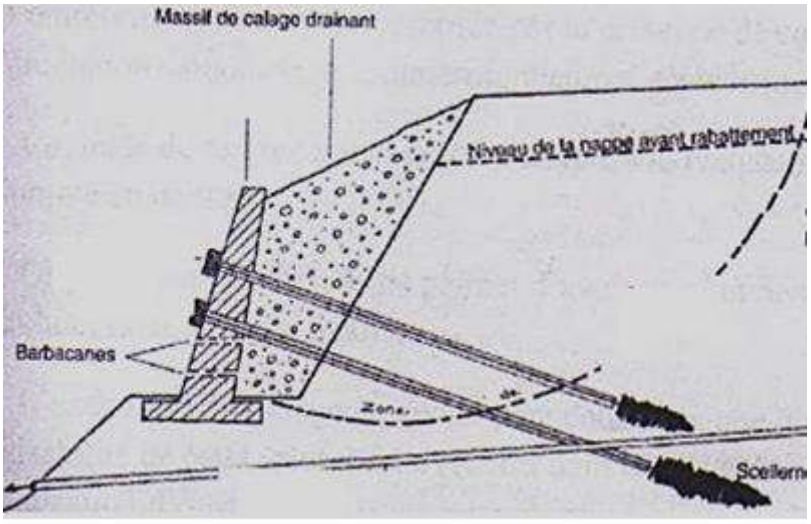


Figure I-13 : Illustration d'un renforcement par mur de soutènement (BENHADOUCHE et NEHAOUA.

2-Renforcement par rideaux de palplanches:

Les palplanches sont généralement en acier en grandes plaques, qui s'emboîtent l'une à l'autre différemment selon leurs types. Celles en béton, étant trop lourdes et trop fragiles, pour les ouvrages imposants comme les parkings souterrains. Le profil d'une palplanche peut être de forme diverse.

Les palplanches sont en principe utilisées en complément d'un autre type de paroi et forme rarement l'enceinte proprement dite. Elles assurent surtout un rôle d'étanchéité additionnelle en formant un écran tout autour de l'enceinte côté terrain. [7].



Figure I-14 *: Les palplanches.*

3-Renforcement par gabion :

Les Gabions sont utilisés pour la protection des pentes (le long des autoroutes, lignes ferroviaires ou des routes de montagne).

Un gabion est une caisse parallélépipédique en treillis métallique remplis de pierres L'empilement de ces gabions comme il est présenté dans la figure (I-15), peut constituer une solution de soutènement des remblais hétérogènes et des éboulis.

Ce mode de soutènement de type, poids, est pratiquement l'un des modes les plus anciens. Il présente l'avantage d'une mise en place aisée et rapide.

En général la végétation permet de bien les intégrer dans le paysage, La durabilité est celle des fils de fer galvanisés constituant les cages. Elle dépasse la cinquantaine d'année même dans les zones côtières.

Présentant un comportement relativement souple, les murs en gabion sont généralement utilisés dans le cas d'ouvrages en déblais (après terrassement) hors nappe sur des terrains assez résistants ou même rocheux (sites montagneux notamment). Ils nécessitent ainsi un terrain de fondations de qualité moyenne. [7].



Figure I-15 : Mur de soutènement en gabion.

4-Renforcement par soutènement en TEXSOL.

Les caractéristiques du matériau TEXSOL permettent de réaliser des talus de soutènement dont les pentes peuvent dépasser 75 degrés. Ces ouvrages très raides exécutés en déblai ou en remblai simultanément aux terrassements apportent une solution simple pour contenir les glissements de terrain ou stabiliser les talus en conservant des emprises limitées. [7].

5-Renforcement Par Parois Cloutées.

Les parois cloutées sont à caractère provisoire permettait la tenue de talus de grande hauteur. Il est maintenant développé en site urbain, en soutènement vertical définitif. Les clous sont des éléments passifs de quelques tonnes jusqu'aux tirants précontraints. Le blindage peut être réalisé en béton projeté, béton fibre, béton banché ou par éléments préfabriqués. [7].

I-5-2-2 : Renforcement.

1-Tirants d'ancrage.

Le principe consiste à réduire les forces actives du glissement et à accroitre les contraintes normales effectives sur la surface de rupture. Pour ce faire, on ancre des tirants constitués de câbles d'acier multi torons dans le terrain stable situé sous la surface de rupture, et on applique en tête un effort de traction.

Cet effort peut être réparti sur la surface du terrain par l'intermédiaire de plaques ou de petits massifs en béton armé. Dans de nombreux cas, les tirants sont combinés à un mur ou à des longrines figure (I-16).

Les ancrages sont efficaces dans :

-des terrains naturellement cohésifs (argiles et silts à basse plasticité et donc peu déformables).

-des terrains naturellement cimentés ou des sables et des graviers présentant une cohésion réelle (due à la fraction fine) ou apparente (fournie par l'humidité).

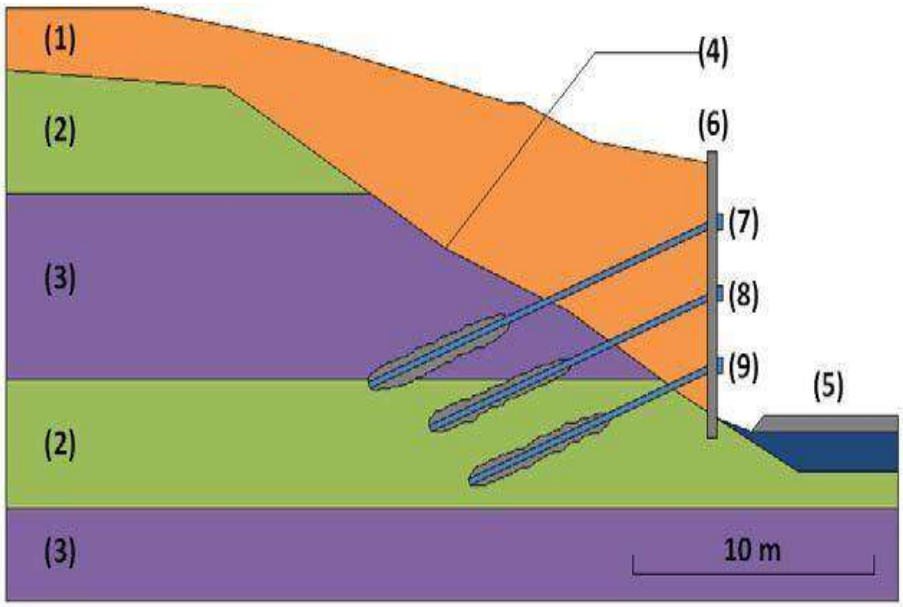
-des roches disloquées.

-des terrains situés au-dessus de roches de mauvaise qualité.

L'utilisation des ancrages n'est pas recommandée pour les interventions qui concernent la stabilisation des terrains meubles présentant un comportement cohésif.

Technique réservée aux sites de faible extension et qui n'ont pas encore glissé. Elle est mal adaptée à la configuration des glissements de versants naturels lorsqu'elle est associée à des

rideaux (palplanches, parois moulé) à cause des modifications apportées au champ des écoulements hydrauliques. [8].



(1) remblai, (2) grès, (3) argile, (4) surface de glissement, (5) route,

(6) parement, (7, 8, 9) tirants d'ancrages.

Figure I-16: Exemple de stabilisation d'un talus par tirants d'ancrage

2-Le clouage :

C'est une technique qui consiste à renforcer des sols in situ par des barres passives. Ces barres peuvent être battues ou scellées dans des trous de forages. Elle est principalement développée dans deux domaines figure (I-17) :

-Soutènement des excavations

-Stabilisation des pentes

Ces inclusions métalliques peuvent travailler aussi bien en traction, en flexion ou en cisaillement, suivant le type d'ouvrage. [8].

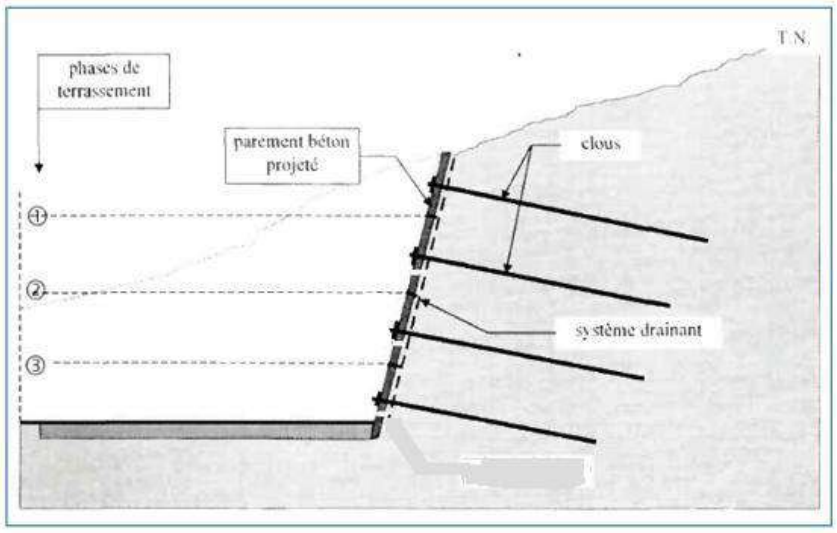


Figure-17 : Stabilisation par Clouage.

Dans le renforcement par clouage, on distingue habituellement deux catégories d'inclusions, en fonction de l'inertie des armatures utilisées :

2-1-Renforcement par micropieux.

Dont l'élément de renforcement est constitué par une barre ou un tube d'acier de petit diamètre (20 à 40 mm) et qui, par suite de leur faible inertie, sont mis en place obliquement ou verticalement, avec une forte densité (environ un clou pour 4 m^2).

La stabilisation d'un talus par des **clous** et **micropieux** repose sur le principe suivant : la partie supérieure du massif en mouvement engendre une déformation des clous et les efforts qui en résultent sont transmis par les clous au substratum qui s'oppose alors au mouvement. [7].

2-2-Renforcement par pieux.

Ce sont des éléments de grande rigidité (section allant de 0.5 à II.0 m), placés verticalement, sur une ou plusieurs files en quinconce, pouvant être retenus en tête dans certains cas par une poutre de liaison et des tirants. Le clouage de glissement par des pieux ou des barrettes procède du même principe. Toutefois compte tenu de leurs inerties importantes, les pieux travaillent principalement en flexion /cisaillement alors que les clous de faible inertie travaillent en traction/flexion. Généralement, on dispose deux ou trois rangées de pieux dans le tiers central de la pente instable figurent (I-18). [7].

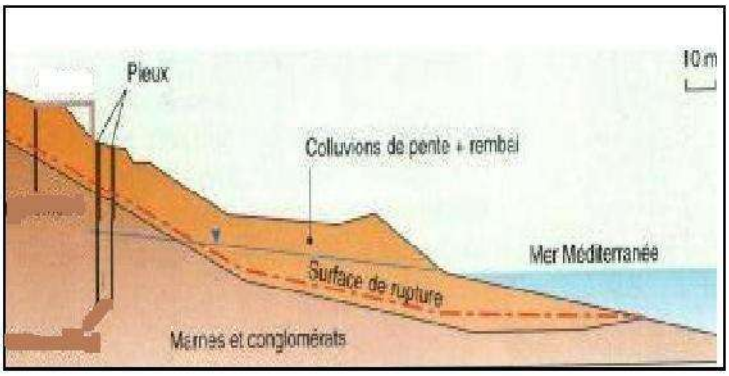


Figure I-18: Clouage de pieux (www.syntecingenierie.fr/media/uploads/tables.../4geotechnique.pdf)

A-pieux-Voile (paroi composite) :

B-Renforcements avec paroi Moulées :

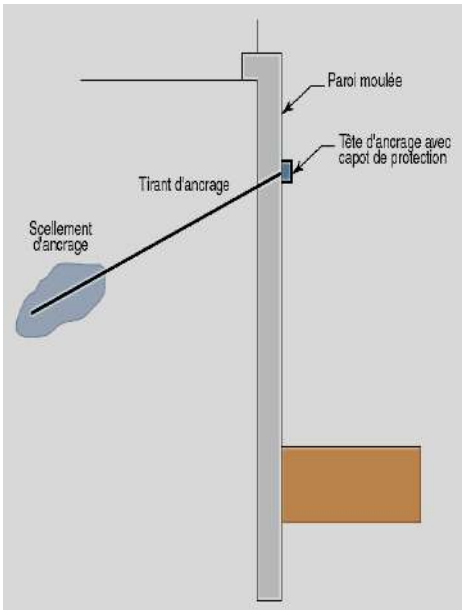


Figure1-19: Schéma de principe de paroi moulée.

3-Renforcement Par géosynthétique.

Les géo synthétiques ne font pas partie au sein strict de la famille des géo matériaux, qui sont généralement des matériaux naturels comme le sol, la roche…Les géo synthétiques sont fabriqués dans des usines, et à base de polymères dans la plupart des cas. On les appelle "géo synthétiques" car ces matériaux synthétiques sont souvent utilisés conjointement avec le sol ou la roche.

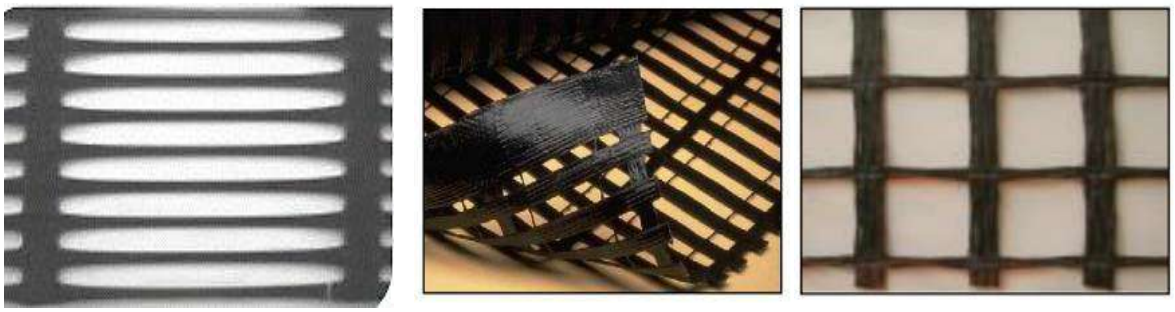
Les terres ont un module d'élasticité assez faible et donc ne sont pas capables de supporter toutes les forces que les constructions exercent lors de la mise en place des charges. Les forces de traction ainsi apparues peuvent être transmises et absorbées par des géo synthétiques **géogrille, géotextile ou géocomposite**. Les géo synthétiques agissent comme un renfort, et on parle alors de sol ou remblai renforcé. [6].



Figure I -20: Renforcement par géo synthétique.

3-1-Renforcement Par géogrille.

Les géo grilles sont classées parmi les produits géo synthétiques. Elles se présentent sous la forme de grilles monolithiques, tissées ou à fils soudés dont la maille peut avoir des formes diverses. En particulier, on peut distinguer les géo grilles uni axiales ayant une résistance à la traction plus élevée dans une direction que dans la direction perpendiculaire et dont la maille est allongée, et les géo grilles bi axiales ayant la même résistance dans les deux directions du maillage qui, dans ce cas, est carré. [7].



(a)-géogrilles (b)-uniaxiale (c) –biaxial

Figure I-21: Géogrille tissé.

3-2- Renforcement Par géocomposites :

Un géocomposite est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géo synthétique, par exemple une géo grille complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonctions de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement (fonction de renforcement, particulièrement en réfection).

Un géo composite de renforcement apporte en une pose, les avantages du géotextile non-tissé et ceux d'un géo synthétique de renforcement, géotextile tissé, tricoté ou géo grille.

Les différents composants peuvent être assemblés liés par couture ou soudure thermique. [6].

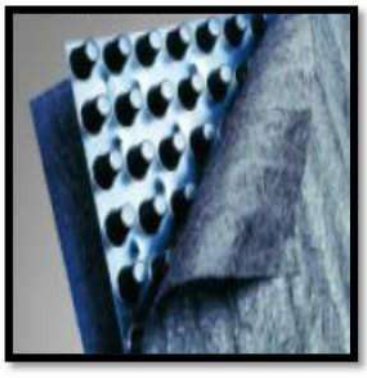


Figure I-22 : Géocomposite

3-3-Renforcement par géotextiles.

3-3-1-Définition.

Les géotextiles sont des nappes continues de fibres ou filaments tissés, non-tissés, tricotés ou thermo-soudés. Les nappes sont souples et perméables et ressemblent en général à des textiles. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion.

***Un non tissé** est un géotextile se présentant sous forme d'une feuille manufacturée, constituée d'un voile ou d'une nappe de fibres, orientées selon une direction ou distribuées aléatoirement [6].



Figure I-23 : géotextile non tissé.

***Un tissé** est constitué de séries de fils perpendiculaires combinés de façon systématique (exemple : des tissus utilisés pour des chemises, des voiles de bateaux, les bâches). (Fig. I-24).



Figure I-24 : Géotextile tissés.

***Un tricoté** est un géotextile produit par assemblage de deux nappes de fils parallèles au moyen D'un fil de liaison, de façon à obtenir la répartition géométrique désirée.

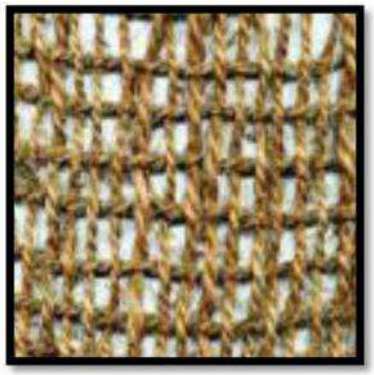


Figure I-25 : Géotextile tricoté.

3-3-2- Propriétés présentation du matériau.

Le géotextile apporte une solution pour la protection des terrains car il permet de renforcer et stabiliser les différents sols. Il est présenté sous forme de rouleaux avec des dimensions de 25 à 200 mètres de longueur et de 0.5 à 6 mètre de largeur. Un emballage plastique étiqueté est prévu pour tous les rouleaux. Le géotextile fait aujourd'hui partie des matériaux de construction, il est indispensable pour les travaux effectués sur le terrain.

En cas de construction de talus, soutènements ou berges dont la pente doit excéder le talus naturel, il est possible de raidir les pentes pour obtenir l'angle souhaité, grâce à l'inclusion de nappes de géo synthétiques (géogrilles ou géotextiles) installés en lits horizontaux entre chaque passe de compactage.

Le parement de l'ouvrage peut être réalisé au moyen de gabion ou éléments béton (éléments préfabriqués ou panneaux en L), le géosynthétique servant d'armature horizontale. [7].

3-3-3-Application.

L'application des géotextiles couvre un large domaine du génie civil : Travaux routiers, Terrassements généraux, Tavaux ferroviaires et Travaux maritimes. [9].

3-3-4-Ces avantage.

- Dissipation plus rapide des variations de pressions.
- Une meilleure mise en œuvre des matériaux granulaires.
- Une économie sur le volume des enrochements ou du déblai hydraulique

- Une stabilisation accrue de la fondation des ouvrages
- Une protection contre la contamination des sols en place
- Un drainage des eaux interstitielles. [9].

3-3-5-Différentes fonctions des géotextiles.

-Séparation : Le géotextile permet de séparer efficacement des matériaux de différente granulométrie comme le gravier, les pierres ou le sable. Il évite le mélange permettant à chaque matériau de garder ses propriétés mécaniques.

-Filtration : De par sa structure microporeuse, le géotextile permet à l'eau de s'écouler en retenant les particules fines du sol.

-Drainage : Le géotextile peut transporter latéralement d'importants débits d'eau, il permet ainsi de drainer les sols et par conséquence favoriser la stabilité des massifs où il est posé en évitant les poussées dues à l'eau.

-Protection : Il empêche ou limite les endommagements localisés par un élément ou un matériau donné.

-Renforcement : Il a la capacité de résister pour améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction. [7].

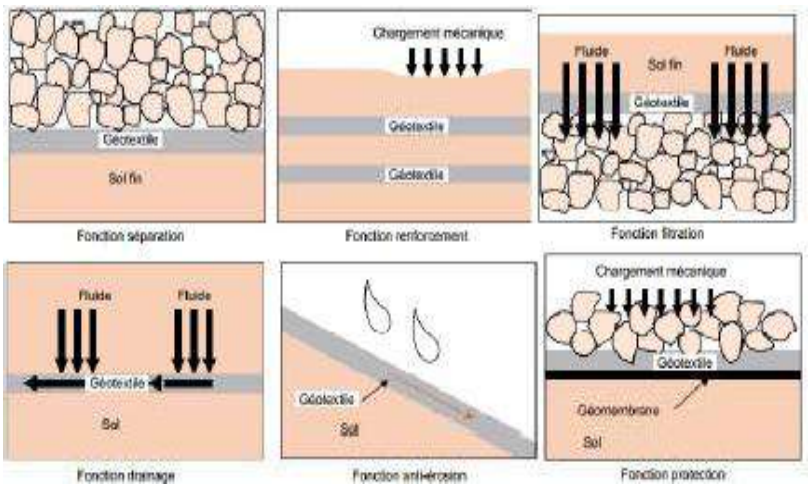


Figure I-26: Les différentes fonctions des géotextiles.

I-6- Stabilités du talus renforcé.

I-6-1 : Historique de la technique.

L'idée de renforcer les sols par inclusion n'est pas récente. Dès l'ancienne Egypte, les bâtisseurs des Grandes Pyramides utilisaient des rampes renforcées empiriquement grâce à la mise en place de lits de roseaux et aléatoirement de poutres en bois de palmier. Ces rampes étaient des sortes de remblais provisoires pouvant atteindre 20 mètres de hauteur et servant à hisser les blocs constitutifs de l'édifice.

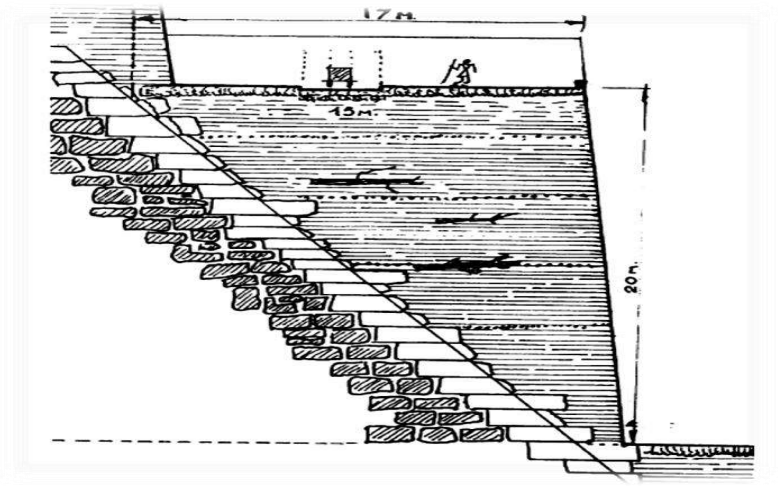


Figure I-27 : Rampes de pyramides (d'après Les bâtisseurs des grandes pyramides, G. Goyon, Pygmalion, 1990).

Au début de 20ème siècle, la technique de renforcement des sols a été développé, dont les inclusions de poutre, tirants, ancres en bois ou en métal et grillage ont été employé [10] Aujourd'hui, les techniques de renforcement ont heureusement évolué et de nouvelles méthodes de calculs sont apparues et se sont affinées au cours des trente dernières années, en particulier depuis l'avènement de la Terre Armée en 1963. Depuis lors, cette technique a largement été utilisée à travers le monde avec pas moins de dix mille ouvrages (Fondations et Ouvrages en terre, G. Philipponat, B. Hubert, éd. Eyrolles, 1998) construits avec cette méthode

Depuis 1965, cette technique a été le sujet de nombreuses évolutions en France, les efforts se sont concentrés sur le développement et l'optimisation des éléments de renforcements dans les diverses formes et matériaux. En effet plusieurs travaux de

recherches expérimentales et théoriques ont été entrepris dans les laboratoires et les universités pour atteindre une meilleure compréhension de la conduite de la terre armée.

En 1966, au cours d'une conférence, l'inventeur de la terre armée Henri Vidal, a présenté pour la première fois ce nouveau matériau, devant la Comité Française de Mécanique des sols A cette occasion, le Laboratoire Central de Ponts et Chaussée, a pris connaissance de cette technique et des possibilités qu'elle pouvait offrir pour la solution de problèmes difficiles, la construction des remblais de grande hauteur sur des pentes naturelles instables a été propagée Parallèlement, avec les progrès de l'industrie pétrochimique se sont développées les méthodes de renforcement par géo synthétiques (géotextiles, géo grilles,…). La réalisation du premier ouvrage renforcé par géotextiles sur l'autoroute A15 date de 1971 (Puig et Blivet, 1973).

Des techniques alternatives sont apparues qui mettent en œuvre différents procédés : renforcement par pneus usagés, par treillis métallique, [4].

I-6-2 : Définition des stabilités.

Le traitement des sols est souvent exécuté pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

Les techniques de stabilisation les plus utilisées sont :

- la stabilisation mécanique ;
- la stabilisation thermique ;
- la stabilisation chimique.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

I-6-3- Type des ouvrages de soutènement.

Les ouvrages de soutènement sont conçus pour créer une dénivelée entre les terres situées à l'amont de l'ouvrage, c'est-à-dire soutenues par celui-ci, et les terres situées à l'aval, devant l'ouvrage.

Cette dénivelée peut être réalisée en procédant à la mise en place de remblais derrière l'ouvrage (auquel cas on parle généralement d'ouvrage en remblai ou en élévation) ou par extraction de terres devant celui-ci (auquel cas on parle généralement d'ouvrage en déblai ou en excavation).

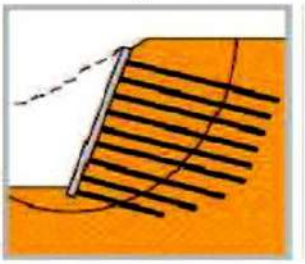
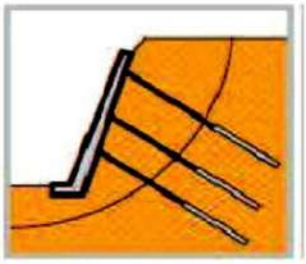
Différentes techniques de soutènement (suite)			
Massif Cloué 	- Clous injectés, - Clous battus, - Parement souple ou rigide.	- Ouvrage exclusivement en déblai et hors d'eau, - Technique employée pour le Renforcement d'ouvrages existants, - Technique souvent employée pour des soutènements provisoires.	- Sa réalisation demande un certain savoir-faire, - Un sol de moyenne qualité peut convenir.
Voile & Poutres Ancrés 	- Voile situé dans un même plan ou dans des plans décalés (gradins).	- Ouvrage de soutènement en déblai, - Ouvrage de stabilisation, - Poutres ancrées pouvant être utilisées pour assurer la stabilité d'un ouvrage réalisé en remblai.	- La réalisation demande l'intervention d'une entreprise spécialisée, - Presque tous les terrains peuvent convenir avec plus ou moins de problèmes délicats à résoudre.

Figure I- 28- différentes techniques de soutènement.

Le choix d'un ouvrage de soutènement dépend notamment de son implantation (en remblai, en déblai), du site (aquatique ou terrestre), du sol de fondation (caractéristiques mécaniques, hydrologie) et des contraintes d'intégration dans l'environnement (nuisance, traitement architectural).

I-6-4-Les ouvrages en remblais renforcé.

En vue générale d'un massif en sol renforcé, on voit trois éléments constitutifs.

- Le sol granulaire formant la masse ;
- Les armatures placées horizontalement et qui résistent à la traction ;
- Le parement qui a le rôle de limiter le bloc armé dans l'espace et d'éviter les ruptures locales et l'érosion superficielle.

Les distinctions entre les différentes techniques se font en fonction de :

-La nature des nappes ou inclusions de renforcement (géotextiles ou produits apparentés types géo grilles, grillages métalliques, nappes métalliques ;

-La nature du parement. [11].

I-6-4-1-Les différents types des parements.

Les parements mis en œuvre pour des ouvrages en sol renforcé sont très nombreux. On peut citer par exemple :

- Panneaux de pleine hauteur.

Ces panneaux (Figure I-29) sont préfabriqués d'une seule pièce, d'une hauteur totale égale à celle du mur en remblai renforcé à construire. Généralement, la largeur de ces panneaux est de l'ordre de 1 à 3 m et leur épaisseur est de 100 à 200 mm. [4].

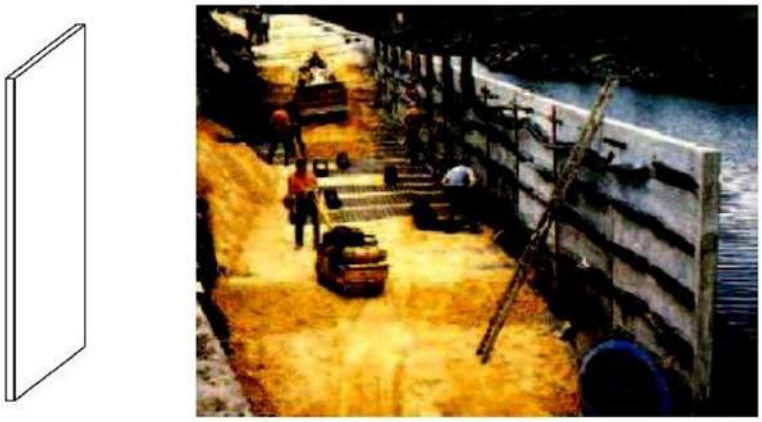


Figure I-29 : Panneaux de pleine hauteur.

- Panneaux de hauteur partielle.

Les panneaux les plus utilisés sont les écailles cruciformes en béton ces panneaux, leur hauteur est en général de 1 m à 2 m et leur épaisseur de 100 à 200 mm. Les formes distinctives de ces panneaux sont liées à leurs modes d'assemblage et aux méthodes spécifiques de construction.

Des formes rectangulaires simples sont également disponibles. Les panneaux sont équipés sur leur face arrière des dispositifs d'accrochage intégrés. Leurs tranches sont en général munies de becquets ou de rainures et languettes. [4].

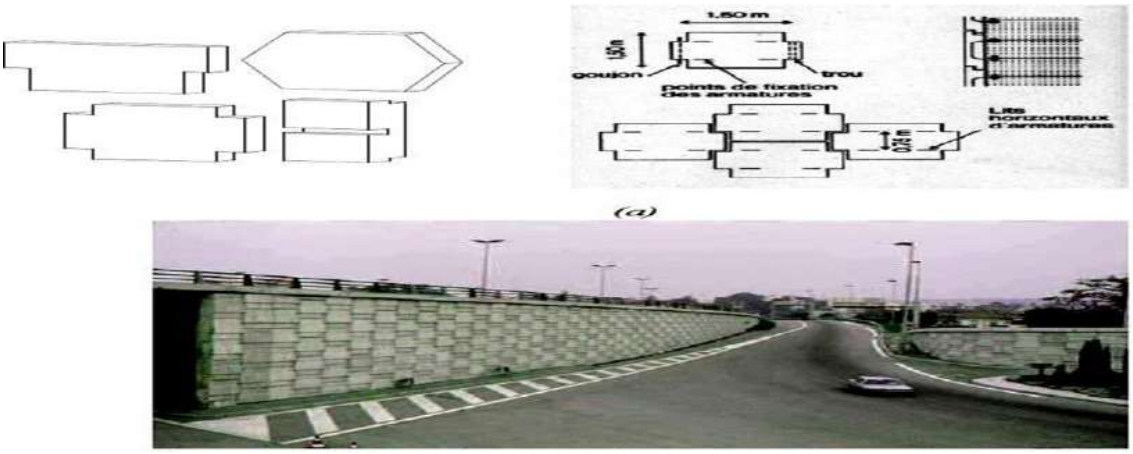


Figure I-30 : Panneaux de hauteur partielle il existe aussi autres types des panneaux comme :

-Panneaux inclinés :

Sont des éléments inclinés en béton préfabriqué (Figure I.31), munis du côté intérieur de contreforts qui s'appuient sur le remblai compacté.



Figure I-31 : Panneau incliné préétablie.

-Jardinières :

Sont des éléments préfabriqués en béton généralement constitués d'une dalle inclinée (Figure I.32), soutenue par des contreforts extérieurs ou par des joues latérales qui s'appuient (partiellement ou complètement) sur le remblai compacté.





Figure I-32 : Jardinières.

- Parement cellulaire.

Les éléments cellulaires du parement protègent les géosynthétiques des rayons U.V., retiennent le remblai adjacent à la face et servent de coffrage à la construction. Les cellules peuvent être pleines ou creuses. La masse de ces éléments est d'ordinaire comprise entre 20 kg et 50 kg. Leur hauteur est en général comprise entre 150 mm et 250 mm, et la longueur de la face vue varie entre 200 mm et 500 mm.

Cette technique est la plus utilisée notamment pour la construction de fausses culées et le raidissement des talus autoroutiers.



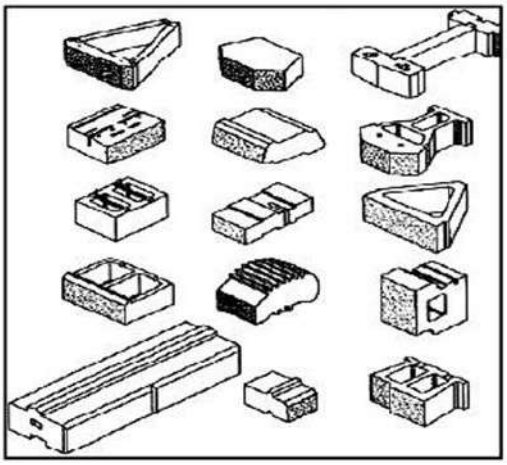


Figure I-33: Parement cellulaire.

- Parements semi-elliptiques en acier.

Éléments de parement cylindriques en tôles d'acier cintrés en forme d'une demi-ellipse ou de U (Figure I.34). Ces éléments, qui sont placés horizontalement, ont d'ordinaire une épaisseur de 2 à 4 mm, une hauteur de 250 mm à 400 mm et mesurent quelques mètres de longueur. Ils sont munis de trous sur leurs bords horizontaux pour la jonction avec les

renforcements.

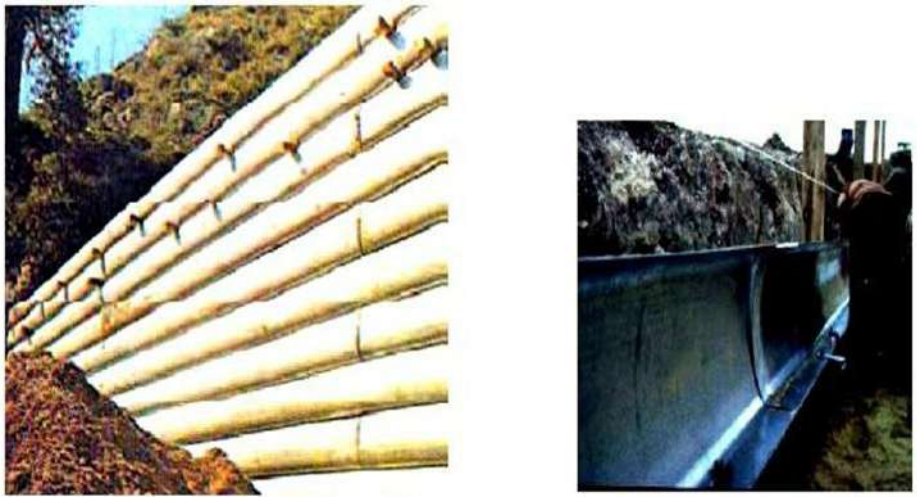


Figure I-34 : Parement semi-elliptiques en acier.

- Parement treillis soudé en acier.

Ces éléments peuvent être associés à la végétation pour éviter l'érosion à long terme de la surface. Lorsqu'ils sont utilisés pour des parements verticaux ou à fruit, ces éléments peuvent être garnis du coté intérieur de caillou ou de pierre cassée, ou être doublés d'une nappe en géosynthétique, en particulier pour les applications provisoires.



Figure I-35 : Parement treillis soudé en acier.

- Parement face enveloppée.

Le remblai est renforcé par des nappes de géotextiles ou de géogrilles, formant également la face du mur. La protection des géotextiles contre les rayons U.V. de la face du mur est assurée par des couvertures spéciales, des parements construits devant la face enveloppée ou par des terres végétalisables.

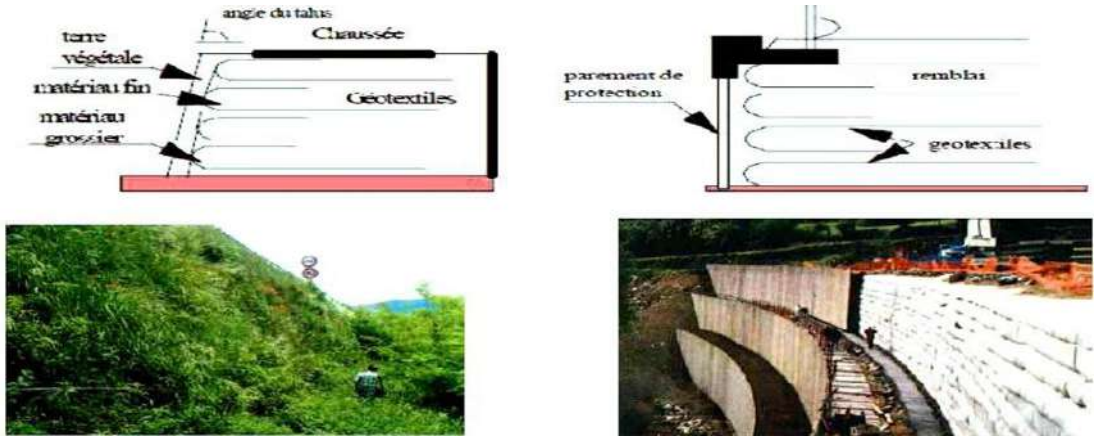


Figure I-36: Parement à face enveloppée.

- Parement forme de gabions.

Le parement dans ce cas est formé par l'empilement de gabions les uns sur les autres en combinaison avec des bandes ou des nappes de géosynthétiques, permettant d'obtenir un massif renforcé (Figure I.37) Ces cages, remplies de cailloux ou de pierres cassées, mesurent D ordinaire de 0,5 m à 1,0 m de hauteur, 2 m à 3 m de longueur et 0,5 à 1,0 m de profondeur. Les cages de gabion peuvent être fournies avec une queue qui sert de raccordement par frottement avec le renforcement principal.

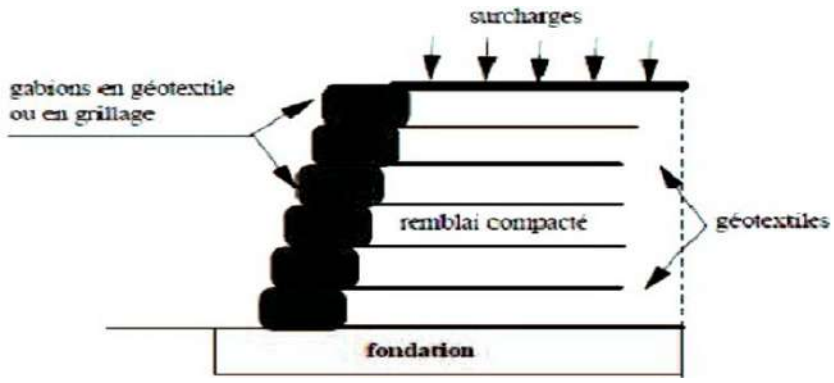


Figure I-37 : Murs avec un parement formé de gabions.

I-7-Conclusion.

Les méthodes d'améliorations et renforcements des sols dans un talus renforcé sont très variées, elles possèdent un certain nombre de points communs, aussi bien au niveau du comportement local, de l'interaction entre le sol et le renforcement qu'au niveau global du comportement de la structure.

Ces méthodes de confortement permettent de garantir la stabilité, tout en suivant une certaine procédure qui pourrait être utilisée comme un guide méthodologique et reste ouvert à toute tentative d'amélioration, d'adaptation et de développement.

Le choix entre les méthodes disponibles est à la responsabilité de l'ingénieur qui doit fonder sa réflexion en tenant compte des conditions techniques du problème, de la capacité.

II-1-Introduction :

Outre l'investigation expérimentale prélèvement in situ, nous avons réalisé une campagne d'essais de laboratoire sur les échantillons de sol, remaniés ou intact, extraits lors du sondage carotté réalisé. [7].

Les essais de laboratoire se divisent en deux grandes catégories :

Les essais d'identification et classification de sol ; Les essais d'identification et classification des sols en laboratoire, ont pour but de confirmer et/ou de compléter l'identification et la dénomination provisoire des sols effectués sur site

-essai proctor normale.

-analyse granulométrique.

-masse volumique absolu.

Les essais de détermination les caractéristiques mécaniques des sols ;

-Essai de Cisaillement rectiligne à la boite de Casagrande, (C, φ).

II-2- Matériaux utilisés :

a-Sable :

Le sable de dune de HASSI BAHBEH de la caractéristique suivant.

Cohésion, C (kPa)	Angle de frottement, (˚).	La masse volumique sache.
1,73	35,25	16,30

Tableau II-1 : caractéristiques de sable.

b-Géotextile PES 150.

Masse surfacique	Résistance à la traction
418,2g/m^2	130,8 KN/m

Tableau II- 2 : caractéristique de géotextile.

II-3-Présentation des essais :

1-Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions des grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue par **tamisage** pour les grains d'un diamètre supérieur à 80 µm. Les résultats sont exprimée sous forme de courbes appelées "courbes granulométriques" qui donnent le pourcentage cumulé d'éléments de dimension inférieur à chaque diamètre.

Atterberg classait les grains du sol suivant une progression géométrique de raison

1/10, Critère su lequel se base la classification française **LCPC** qu'on va utiliser dans cet essai. [7].

Dimensions	Nomination
∅>200mm	ENROCHEMENT
20mm<∅<200mm	CAILLOUX
2mm<∅<20mm	GRAVIER
0.2mm<∅<2mm	SABLE GROS
0.02mm<∅<0.2mm	SABLE FIN
2µ<∅<20µ	LIMON
0. 2µ<∅< 2µ	ARGILE
∅< 0.2µ	ULTRARGIL

Tableau II-3 : classification du sol se base LCPC

- **But de l'essai :**

Le but de ces essais est déterminer la distribution de grandeurs de grain (c.-à-d. ; taille de grain contre des pour cent en poids) du sol, et de déterminer le pourcentage des fines (c.-à-d. ; matériel passant le passoir **80µm** dans le sol. Cette information est employée Pour classifier le sol selon le système de classification unifié de sol LCPC.[12] .

1-2-Présentation du résultant :

Tamis	Poids des refus cumulés	Refus cumulés en %	Complément à 100% des refus cumulés
6.3	0.00	0.00	100.00
5.00	6.90	0.69	99.31
2.50	16.8	1.68	98.32
1.25	28.7	2.87	97.13
0.63	185.1	18.51	81.49
0.315	875.9	87.59	12.41
0.16	962.6	96.26	3.74
0.08	972.8	97.28	2.72

Tableau II-4 : tableau de tamisage

-Module de finesse : 2.07.

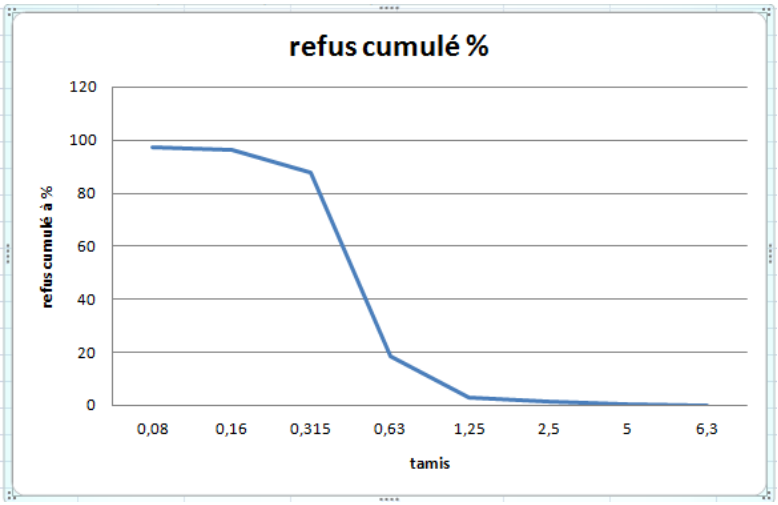


Figure II-1 : Courbe granulométrique

2-proctor normal :

L'essai Proctor Normal ou Modifié permet de trouver la teneur en eau optimale qui conduit au meilleur compactage possible d'un sol. Le compactage de l'échantillon de sol est fait dans un moule normalisé, avec une dame normalisée, selon un processus bien défini (NF P 94-093). La teneur en eau et le poids spécifique sec après compactage du sol sont mesurés.

L'essai est répété plusieurs fois sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. Les points obtenus de cette manière forment une courbe dans l'espace (γ_d;w) et le point

dont l'ordonnée est la densité sèche maximale et l'abscisse est la teneur en eau correspondante représente l'Optimum Proctor. Dans cette étude,

Le compactage Proctor Normal est réalisé en trois couches avec 25 coups de chaque couche de dame dans un appareil de compactage. [13].

-Matériel utilise :

Moule : c'est un tube métallique cylindrique, ouvrable en deux demi-coquilles que l'on peut fixer sur une base, et muni d'une hausse.

Il existe 2 moules :

Le moule proctor, utilisable pour les sols fin.

Le moule c.b.r. utilisé le plus souvent.

Moule	D(mm)	H(mm)
Proctor	101.6	116.5
C.B.R	152	152.5

Tableau II-5 : caractéristique de moule proctor.



Figure II-2: Réalisation de l'essai de compactage.

Résultant de l'essai :

-poids propre de CBR : 4,386kg

-poids de CBR avec sable lâche : 5,771 kg

-poids de CBR avec sable compacte : 5,948 kg

-poids de sable compacte : 1,562kg

-poids de sable lâche : 1,385kg

-volume de boite de cisaillement : 90 cm^3.

-la masse volumique des graines solides : 2630kg/m^3.

- Dr=50%

-la masse de sable utilisée dans la boite : 139,32g.

3-cisaillement à la boite :

L'essai a pour objet de mesurer en laboratoire des caractéristiques de plasticité (rupture) d'un échantillon de sol soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, En sont déduites les valeurs de l'angle de frottement **φ** et la cohésion **C**, paramètres utilisés pour le dimensionnement de fondations, les calculs de vérification des coefficients de sécurité **Fs** à la rupture de talus et pour la détermination des actions de poussée et de butée sur les ouvrages de soutènement .[14].



***Fig*ure *II-3**: appareil de cisaillement.*

- **La procédure de l'essai de cisaillement:**

Pour l'ensemble des essais de cisaillement, la procédure est comme suit :

-Préparer les plaques drainantes

-Découper et tailler l'échantillon

-Peser l'échantillon

-Introduire l'éprouvette dans les deux demi- boites

-Placer le piston muni de sa plaque sur le sommet de l'éprouvette

-Mettre l'éprouvette dans le châssis étanche fixé sur le bâti

-Fixer le système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (T) et noter la valeur d'origine du capteur de l'effort(T)

-Régler la position du capteur de mesure du déplacement relatif horizontal entre les deux demi- boites et noter la valeur d'origine

-Positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston par rapport à un repère fixe et noter la valeur d'origine

-Mesurer le déplacement horizontal du piston δ h en fonction du temps

-Désolidariser les deux demi- boites en enlevant les goupilles

-Mettre en marche la machine à la vitesse désirée

-Noter les lectures données par le capteur de mesure de l'effort(T)

-Arrêter l'essai

-Enlever les poids du tableau de charge

-Enlever la boite du chariot de la machine

-Nettoyer les pierres poreuses et les boites de cisaillement

-Noter les valeurs calculées.[15].

- **Avantages et inconvénients de l'essai de cisaillement direct:**

*** Avantages:**

-Simple

-Rapide

-Economique

*** Inconvénients:**

-Pas de maîtrise des conditions de drainage.

- **<u>Pour les sols pulvérulents :</u>**

-Drainage rapide.

-Contraintes appliquées → contraintes effectives.

- **<u>Pour les sols fins:</u>**

-Cisaillement rapide → contraintes totales et comportement à cour terme.

-Cisaillement lent (μ_m/min) → contraintes effectives et comportement à long terme.

-Concentration de contraintes aux extrémités de la boite

- Rotation des plans principaux.[15].

3-1-description et estimation d'essai :

Dans note essai nous êtes utilisons le géotextile pour le renforcement, et on a varié l'orientation des armatures de ce géotextile dans les cas suivants :

1- Sable propre :

Dans ce cas nous utilisant le sable sans le renforcement par la nappe de géotextile sur la boite de cisaillement, cette opération permis de déterminée les caractéristiques mécanique de ce sable.

*Résultats :

Cohésion, C (kPa)	Angle de frottement, φ (°)
1,73	35,25

2-Sable renforcé :

a- géotextile horizontal.

Dans ce cas la nappe de géotextile (renforcement) est placée dans la boite de cisaillement horizontalement, considérant avec le plan de cisaillement (i,posé) (Fig.II.4) .

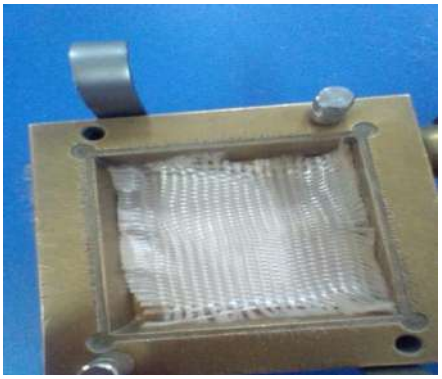


Figure II-4 : géotextile horizontale.

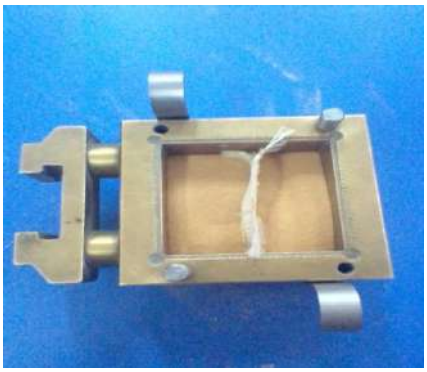


Figure II-5: géotextile vertical.

b-géotextile vertical :

Dans ce cas la nappe de géotextile (renforcement) est placée dans la boite de cisaillement verticalement considérant avec le plan de cisaillement (i, posé) (Fig. II .5).

c-géotextile incline de 45˚ :

Dans ce cas la nappe de géotextile (renforcement) est placée dans la boite de cisaillement incliné de 45˚ considérant avec le plan de cisaillement (posé) (Fig. II.6).

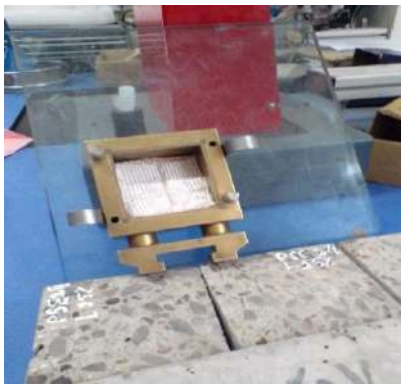


Figure II-6 : géotextile de 45˚.

*Résultant obtenu :

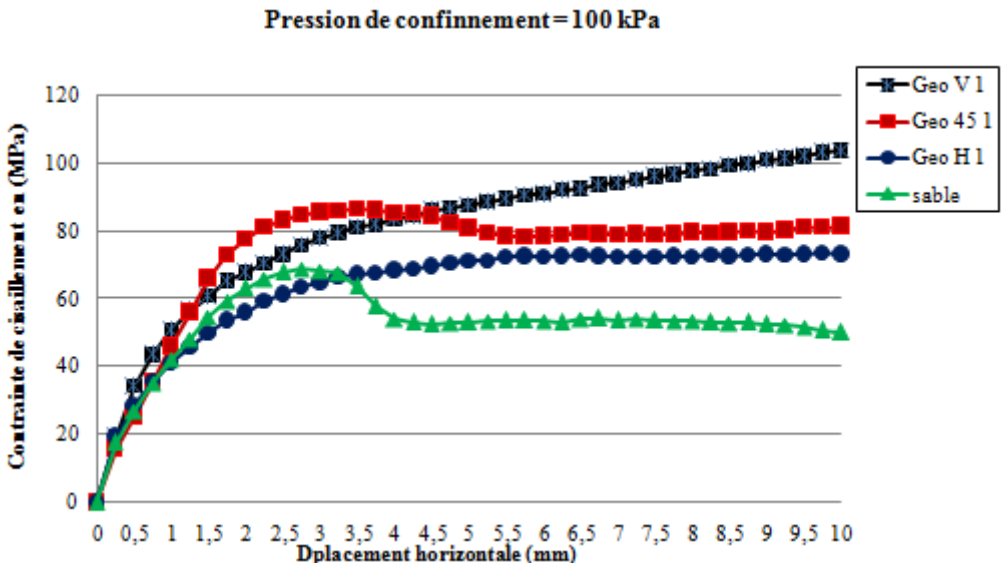


Figure II-7 : Courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontale (mm) de 100 kpa.

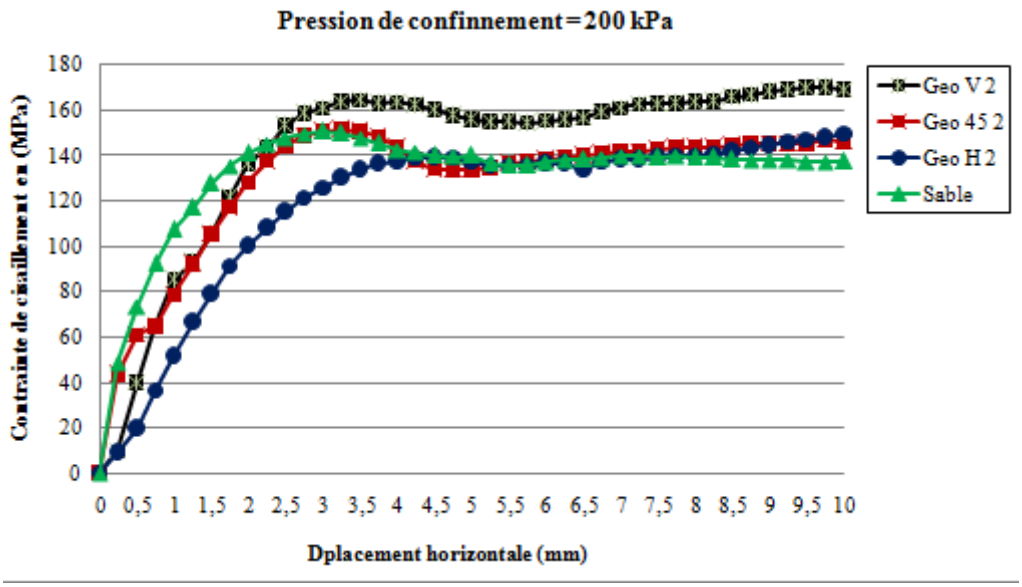


Figure II-8: Courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontal de 200kpa.

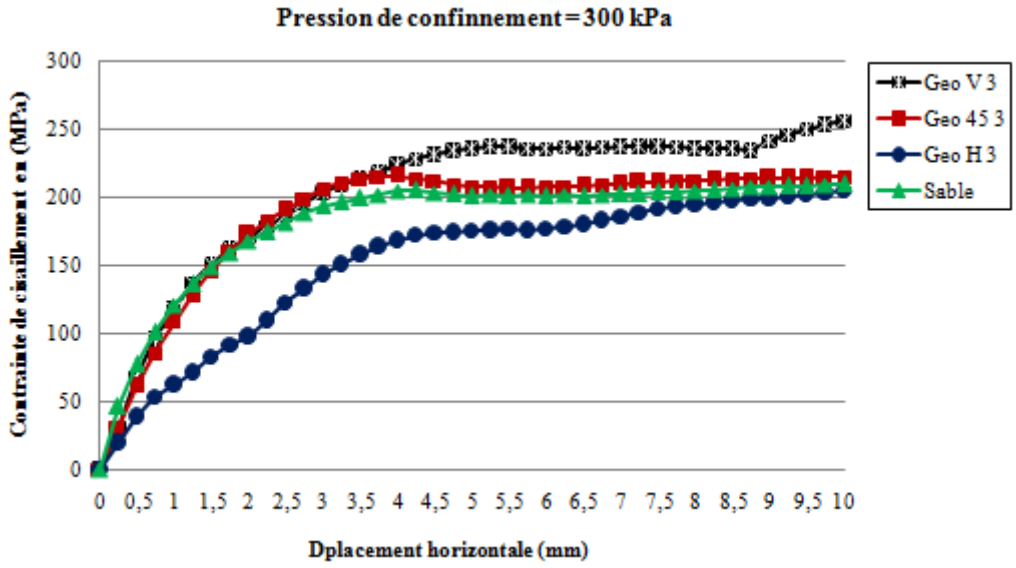


Figure II-9: courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontale de 300 kpa.

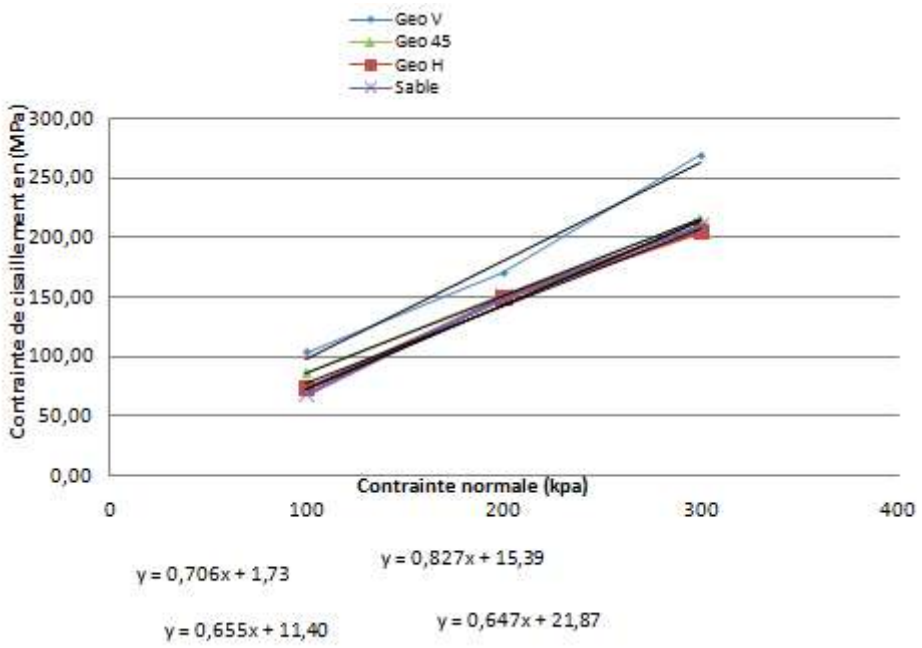


Figure II-10 : droites de contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale (kpa).

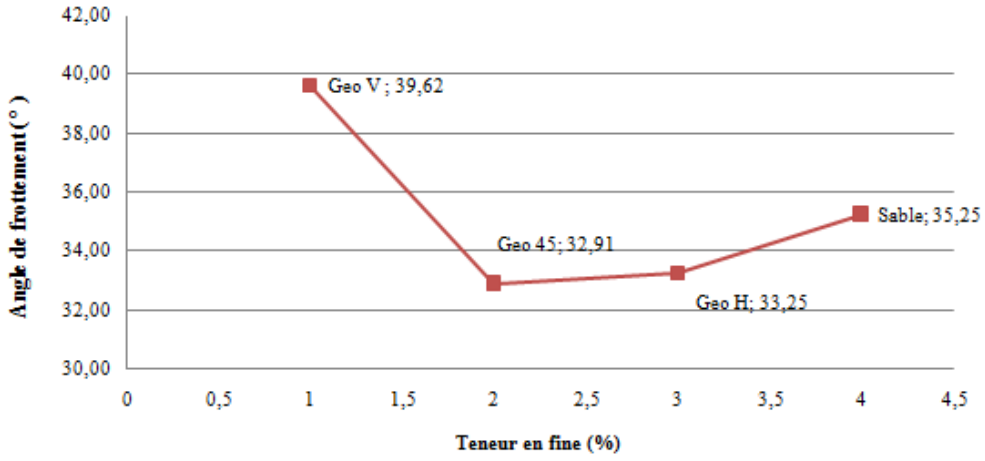


Figure II-11 : courbe d'angle de frottement en fonction de teneur en fine (%).

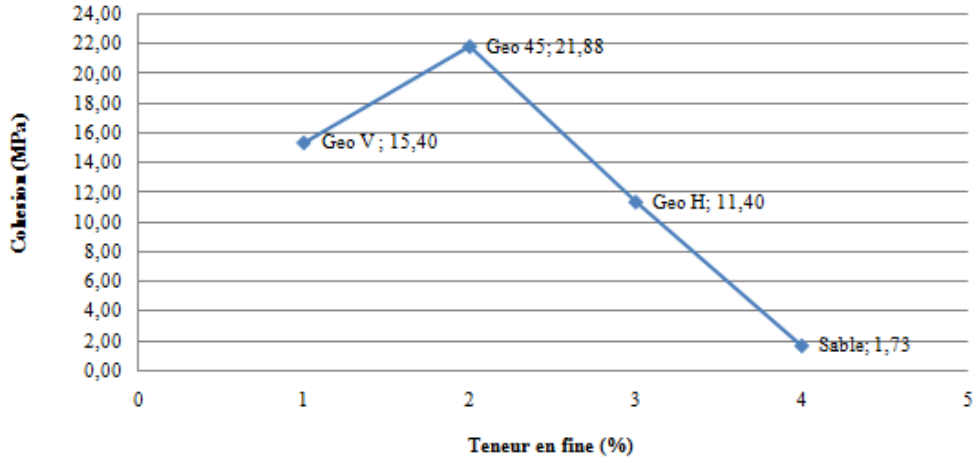


Figure II-12 : courbe de cohésion(Mpa) en fonction de teneur en fine (%).

*Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Dr 50 %				
Fine	**Geo V**	**Geo 45**	**Geo H**	**Sable propre**
100	103,60	86,31	73,51	68,66
200	170,15	151,85	149,45	150,59
300	269,18	215,73	204,64	210,02
C (kpa)	15,40	21,88	11,40	1,73
Phi (°)	39,62	32,91	33,25	35,25

Tableau II-6: les valeurs de **φ et** C de chaque cas.

II-4 : conclusion :

Dans ce partie pratique on réalise trois essais dans laboratoire, analyse granulométrique, proctor et l'essai de cisaillement directe, d'après les résultants de les deux essais premier on fait l'essai de cisaillement pour connaitre la résistance de notre échantillon, puis nous renforçons avec le géotextile et nous marquons notre résultant la cohésion et l'angle de frottement de chaque orientation des armatures de géotextile.

Ces résultats montrent que Les matériaux provenant des couches 1 et 2 présentent des caractéristiques mécaniques faibles à moyenne avant renforcement(C=1.73, **φ** =35.25), après le renforcement le remblai devient de forte caractéristiques mécaniques.

La vérification à la stabilité au glissement (circulaire) menée à l'aide du logiciel de calcul (TALREN4), présenté ultérieurement incorporant la méthode bien connue dite de Bishop. L'analyse à la stabilité a été réalisée en considérant plusieurs cas d'orientations des armatures de renforcement dans le talus. La surface de glissement la plus critique est obtenue en déterminant la surface dotée du coefficient de sécurité minimal parmi une série de surfaces de glissement probables.

A – Présentation du logiciel « TALREN4 »

III-1-Introduction :

Aujourd'hui, ils existent plusieurs logiciels utilisés pour la vérification et le calcul à la stabilité des glissements de terrains, sachant que chaque logiciel incorpore ses méthodes et paramètres de modélisation et de résolution.

Des résultats et des informations variées peuvent être ainsi conclus suivant les approches inclus déjà dans le programme de résolution adapté.

En ce qui concerne l'étude de glissement présentée dans ce mémoire, nous utiliserons un logiciel de calcul basé sur la méthode d'analyse limite appelé « **TALREN 4 ». [7].**

III-2-Présentation du logiciel « TALREN4 » :

« **TALREN 4 »** est un outil d'analyse de stabilité des massifs de terre avec ou sans renforcement. Il permet de vérifier la stabilité des talus naturels, les remblais, les barrages en terre et les digues, en tenant compte de différents types de renforcement appliqués (tirants précontraints, clous, pieux et micropieux, géotextiles, géogrilles et bandes de renforcement).[7].

III-3-Démarche générale d'utilisation de la nouvelle interface :

Le logiciel se compose de deux grandes parties : l'interface (mode) "Données", d'une part, et l'interface "Phasage/calculs" d'autre part.

La démarche classique d'utilisation du logiciel est la suivante :

- Ouverture du logiciel : le mode actif est le mode "Données" ;

- Création d'un nouveau fichier projet ou ouverture d'un fichier projet existant ;

- Définition ou modification des données générales (ou éventuellement aucune modification dans le cas d'un fichier existant) ;

- Basculement en mode "Phasage/Calculs" à l'aide du bouton de la barre de boutons contextuelle prévu à cet effet ;

- La première phase est générée par défaut : l'utilisateur définit ou modifie ses paramètres si nécessaire ;

- La première situation est générée par défaut : l'utilisateur définit ses paramètres ou modifie ses paramètres si nécessaire ;

- Création si nécessaire d'autres situations pour la première phase, grâce aux boutons de la barre de boutons contextuelle ou aux options du menu "Phases et situations ;

- Création si nécessaire d'autres phases, grâce aux boutons de la barre de boutons contextuelle ou aux options du menu "Phases et situations" ;

- Lancement des calculs, soit au fur et à mesure des situations, soit pour toutes les situations d'une phase, soit pour toutes les situations de toutes les phases : le calcul peut être lancé soit à partir des 3 options de calcul du menu "Calculs et résultats", soit à partir des 3 boutons de calcul de la barre de boutons contextuelle ;

- Visualisation des différents résultats, soit sur le dessin, soit sous forme de tableaux de résultats.[16].

III-4 Les avantage de TALREN4 :

L'outil de calcul « TALREN4 » présente plusieurs avantages :

- Gestion des phases d'exécution et situations de calcul d'un projet dans un seul fichier ;
- Tableaux récapitulatifs des données : couches de sol, surcharges et renforcements ;
- Assistance et bases de données (coefficient de pondération /sécurité partiels, chois de q_s). [7].

III-5-Le calcul en TALREN4 :

TALREN4 s'appuie sur des méthodes analytiques éprouvées suivantes :

- Calcul d'équilibre limite selon les méthodes : Fellenius, Bishop ou perturbations.
- Prise en compte des sollicitations hydriques.
- Prise en compte des sollicitations sismiques selon la méthode pseudo-statique.
- Chaque inclusion (renforcement) peut travailler en : traction, compression, cisaillement et flexion.

- Combinaison de différents critères de rupture pour les inclusions et le sol afin d'évaluer l'effort maximal qui peut être mobilisé dans le renforcement (principe du travail maximal). [7].

➢ coefficient de sécurité :

La définition du coefficient de sécurité des talus à l'égard de la rupture est une des questions les plus controversées de la mécanique des sols.

De nombreuses publications ont été faites sur les divers coefficients de sécurité que l'on est susceptible d'adopter pour définir la stabilité des talus. Un coefficient de sécurité peut être définit comme étant un rapport de contraintes, de forces ou de moments. En première approximation on peut caractériser l'état de la stabilité par : $Fs = {}^{\tau_{max}}/_{\tau}$

Facteur de sécurité	**Etat de l'ouvrage reinforce**
Fs< 1	Instable
Fs= 1	Stabilité limite
Fsc=] 1 ; 1,25[	Sécurité contestable
Fsc =]1,25; 1,4[	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu important mais contre c'est sécurité contestable pour les talus des carrières à ciel ouvert
Fs > 1,4	Securité satisfaisante

Tableau III-1 : Valeurs théoriques du coefficient de sécurité.

Méthode de calcul :

Bishop : Quand la surface de rupture est en forme d'arc, on adopte la méthode de Bishop.

La méthode de bishop est basée sur la division du talus en tranches égales, comme dans la méthode de Fellenius, mais en introduisant les forces inter tranches.

III-6-Les différentes options pour la manipulation de l'interface :

III-6-1- Les différentes zones à l'écran :

Les différentes "zones" de l'interface de TALREN 4 sont les suivantes :

- Le menu principal (complété par le menu contextuel) ;
- La barre de boutons générale et les barres de boutons contextuelles ;
- Le navigateur des phases et situations (visible seulement en mode Phasage/Calculs) ;
- La barre d'état ;
- Les boîtes de dialogue.

III-6-2-Le menu, les barres de boutons et le navigante Le menu principal :

Le menu, dont l'arborescence complète est illustrée sur la Figure III.07, comporte les rubriques principales suivantes :

- Fichier
- Edition
- Affichage
- Données La zone graphique
- Phases et situations
- Calcul et résultats
- Option
- Aide



Figure III-1: Exemple du menu principal.

III-6-3-La barre de boutons principale :



Figure III-2**: La barre de boutons principale.**

Les boutons ci-dessus correspondent dans l'ordre aux fonctions suivantes :

- Nouveau fichier
- Ouvrir un fichier enregistré un fichier
- Imprimer
- Zoom sur une fenêtre définie par l'utilisateur
- Zoom avant
- Zoom arrière
- Copier dans le presse-papier l'élément sélectionné
- Capture d'écran
- Commentaires généraux

Les boutons comportent chacun une légende, qui s'affiche lorsque la souris passe dessus.

III-6-4- Les barres de boutons contextuelles :

Les barres de boutons contextuelles "Données" d'une part, et "Phasage/Calculs" d'autre part, ne sont pas affichées simultanément. Est affichée celle qui correspond au mode "actif" du logiciel.

Dans tous les cas, les boutons comportent chacun une légende qui s'affiche lorsque la souris passe dessus.

III-6-5-Barre de boutons contextuels "Données du projet" :

Celle-ci comporte principalement les boutons équivalents aux fonctions du menu "Données du projet" :



Figure III-3: la barre de boutons contextuelle "Données".

Les boutons ci-dessus correspondent dans l'ordre aux fonctions suivantes :

- Outil "Sélection" ;
- Description générale du projet ;
- Dessin de lignes géométriques ;
- Dessin de surcharges (surcharges réparties puis torseurs)
- Dessin de renforcements (clous, tirants, bandes puis butons)
- Définition des jeux de caractéristiques de sol (ouverture d'une boîte de dialogue)
- Basculement en mode "Phasage/Calculs"

III-6-6-Barre de boutons contextuelle "Phasage/Calculs" :

Celle-ci comporte principalement les boutons et objets équivalents aux fonctions des menus "Phases et situations" et "Calculs et résultats" :



Figure III-4: La barre de boutons contextuelle "Phasage/Calculs".

Les boutons ci-dessus correspondent dans l'ordre aux fonctions suivantes :

- Basculement en mode "Données" ;
- Définition des conditions hydrauliques (ouverture d'une boîte de dialogue) ;
- Propriétés de la situation sélectionnée (ouverture d'une boîte de dialogue)
- Calcul de la situation sélectionnée
- Calcul de toutes les situations de la phase sélectionnée
- Calcul de toutes les situations pour toutes les phases
- Configuration de l'affichage graphique des résultats (ouverture d'une boîte de dialogue, accessible seulement si des résultats sont disponibles pour la situation affichée)
- Résultats détaillés par surface (ouverture d'une boîte de dialogue, accessible seulement si des résultats sont disponibles pour la situation affichée)
- Efforts dans les renforcements (ouverture d'une boîte de dialogue, accessible seulement si des résultats sont disponibles pour la situation affichée)
- Résultats détaillés par tranches (ouverture d'une boîte de dialogue, accessible seulement si des résultats sont disponibles pour la situation affichée)

III-8-Tableau récapitulatif des renforcements :

Cette option ouvre une fenêtre dans laquelle sont affichés quatre (04) tableaux récapitulatifs de tous les renforcements définis, accessible par des onglets (un tableau par type de renforcement : (clous, tirants, bandes et butons), Seuls les types de renforcements pour lesquels des éléments ont été définis dans le projet sont présentés.

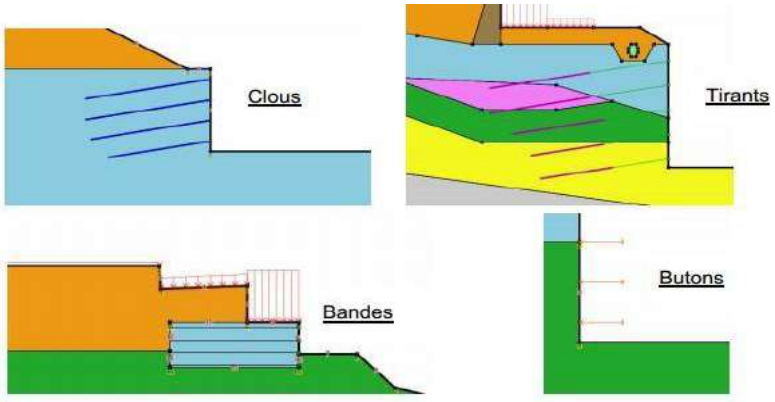


Figure III-5*: exemples de représentation graphique de renforcements*

III-9- Gestion du phasage :

TALREN 4 permet d'étudier des projets, et non plus seulement des coupes, c'est-à-dire que la gestion du phasage d'exécution est intégrée au logiciel : à partir d'une coupe initiale (qui doit comporter tous les éléments qui seront utilisés dans le phasage : lignes géométriques, caractéristiques des sols, surcharges, renforcements), il est possible de définir dans le même fichier plusieurs phases d'exécution successives (chaque phase correspondant à une coupe du projet) :

- Activation/désactivation d'éléments de sols, surcharges, ou renforcements, Modification de certaines caractéristiques de sols,
- Modification des conditions hydrauliques.

Il n'est donc plus nécessaire de créer plusieurs fichiers pour étudier les phases successives d'un même projet.

D'autre part, il est possible de définir plusieurs situations de calcul pour une même phase. Les situations peuvent se distinguer les unes des autres principalement par :

- Une méthode de calcul différente,
- Un jeu de coefficients de sécurité/pondération partiels différent, Des conditions

sismiques différentes,

- Une définition des surfaces de rupture différente.

Il est ainsi possible, par exemple, pour une même phase de calcul (donc une même coupe) de vérifier la stabilité de plusieurs types de surfaces de rupture (plusieurs points de passage pour des cercles par exemple), ou de comparer la situation fondamentale et la situation avec séisme.

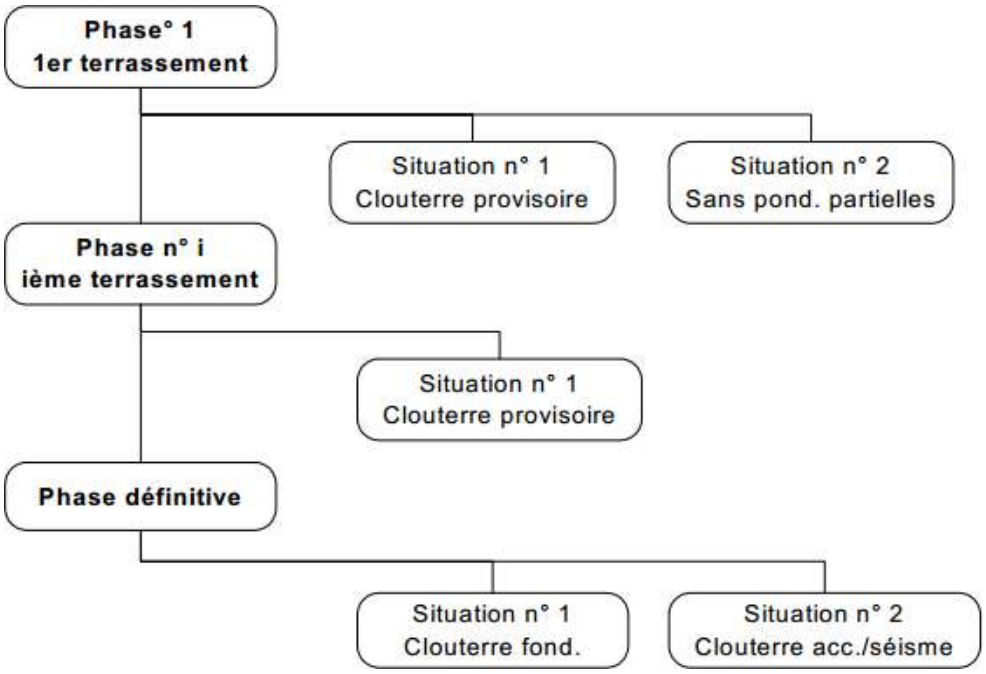


Figure III-6 : *gestion des phases et situations.*

Chaque calcul porte sur une situation de calcul d'une phase d'exécution, Les calculs pour Chaque situation de chaque phase sont indépendants des calculs des autres situations et autres phases. Par exemple, le résultat du calcul pour la situation m de la phase n ne dépend ni des résultats de la phase n-1 ni des résultats de la situation m-1 ni d'aucun autre résultat.

Il faudra donc lancer autant de calculs pour un fichier projet que de situations définies pour toutes les phases du fichier projet.

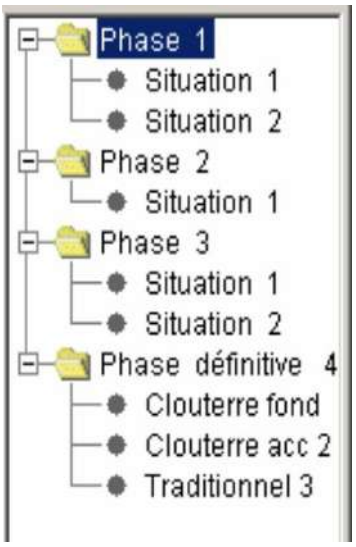


Figure III-7 : navigateur des phases et situation**s.**

III-10- Gestion du phasage:

On accède à la définition des conditions hydrauliques par le menu "Phases et situations" puis l'option "Conditions hydrauliques pour la phase sélectionnée", soit pour la même option dans le menu contextuel (clic droit sur le libellé d'une phase),

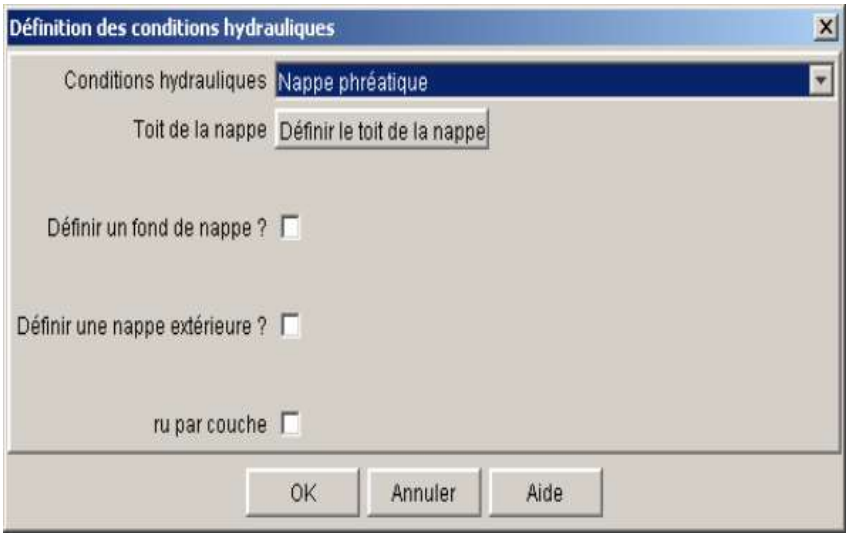


Figure III-8 : définition d'une nappe phréatique.

Il suffit de choisir l'option "Nappe phréatique" puis de cliquer sur le bouton "Définir le toit de la nappe". Une nouvelle boîte de dialogue s'ouvre alors et permet de saisir les points définissant la surface de la nappe.

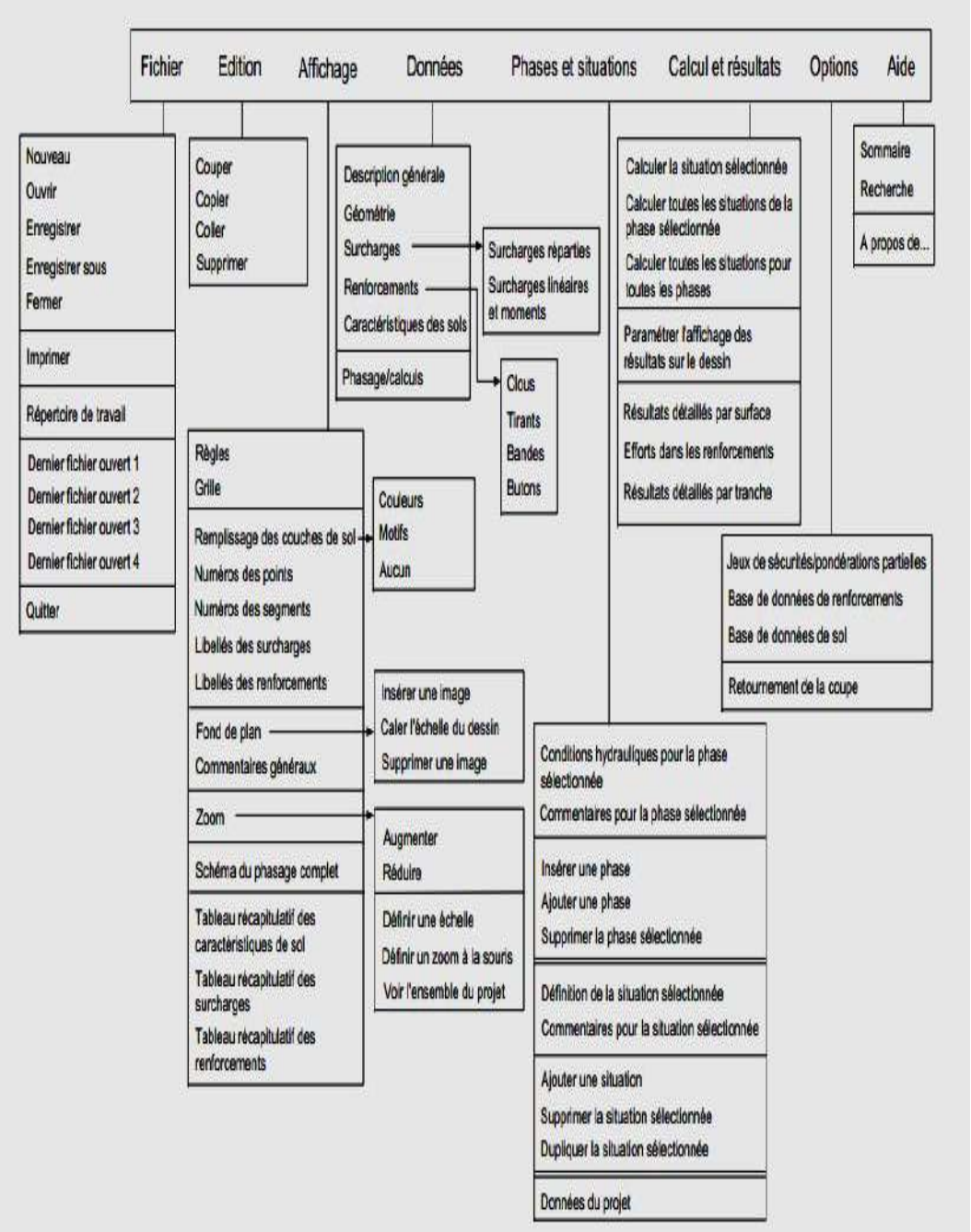


Figure III-9*:* Organigramme montrent les différentes options de la barre d'outil TALREN4**.**

B – Etude d'un cas

III-11-Données géotechniques :

Les **cara**ctéristiques géotechniques prises comme paramètres initiaux dans les calculs sont extraites des essais de laboratoire et qui sont les suivants :

- ***Couche 1*** **:**
  - Cohésion : C =50 KPA
  - Angle de frottement : φ = 6°
  - Densité : $\gamma = 20\ KN/m^3$

- ***Couche 2*** **:**
  - Cohésion : C = 60 KPA
  - Angle de frottement :φ = 8°
  - Densité :$\gamma = 20KN/m^3$

- ***Couche 3*** **:**
  - Cohésion : C =17 kpa
  - Angle de frottement :φ = 19°
  - Densité : $\gamma = 21\ KN/m^3$

- ***Remblai sans renforcement*** :
  - Cohésion : C =1,73 kpa
  - Angle de frottement φ =35,25˚
  - Densité : $\gamma = 16,3\ KN/m^3$

- ***Remblai avec renforcement*** :

a- Remblai renforcée avec géotextile horizontal :

- Cohésion : C =11,40 kpa
- Angle de frottement : φ = 33,25˚
- Densité : $\gamma = 16,3\ KN/m^3$

b- Remblai renforcée avec géotextile vertical *:*

- Cohésion : C =15,40 kpa
- Angle de frottement:φ =39,62˚. Densité : $\gamma = 16,3\ KN/m^3$

c- Remblai renforcée avec géotextile incliné de 45˚ :

- Cohésion : C =21,88 kpa
- Angle de frottement φ: =32,91˚
- Densité : γ = 16,3 KN/m^3

Dr 50 %				
Fine	**Geo V**	**Geo 45**	**Geo H**	**Sable propre**
100	103,60	86,31	73,51	68,66
200	170,15	151,85	149,45	150,59
300	269,18	215,73	204,64	210,02
C (kpa)	15,40	21,88	11,40	1,73
Phi (°)	39,62	32,91	33,25	35,25

Tableau III-2: Remblai avec renforcement

III-12-Géométrie du modèle :

Le profil à analyser est représenté par la figure (III-12) suivante :

- Les paramètres d'entrée sont :
- Les coordonnée x,y utilisé pour la modélisation de la coupe géotechnique (x : Distance, y : Profondeur).
- Les paramètres géotechniques de chaque couche γ (KN/m^3), C (KN/m^3) et φ(°)

Les couches	Couleur	γ (KN/m^3)	C (KN/m^2)	φ(°)
Couche 1	Jaune	20	50	6
Couche 2	Vert	20	60	8
Couche 3	Grise	21	17	19
Remblai	Marron	16.3	1.73	35.25

Tableau III-3: Caractéristiques du sol.

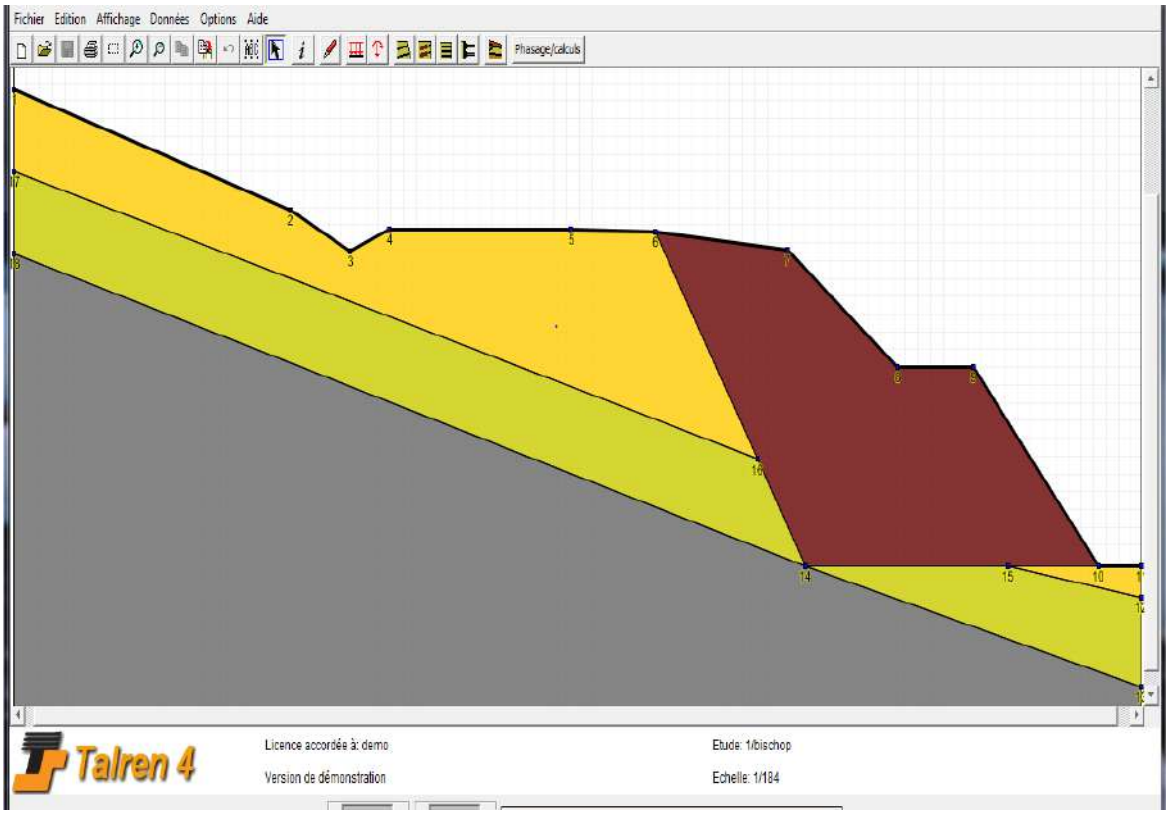


Figure III-10: Domaine d'analyse.

III-13-Calcul du facteur de sécurité :

L'analyse du problème sera effectuée par la méthode Bishop (1954) et suivants plusieurs variantes jouant sur la présence ou l'absence de renforcement de géotextile et sons orientations sur le facteur de sécurité.

III-14-Modélisation du talus sans renforcement :

Cohésion, C (kPa)	Angle de frottement, φ (°)
1.73	35.25

Tableau III-4 : caractéristique de sable sans renforcement.

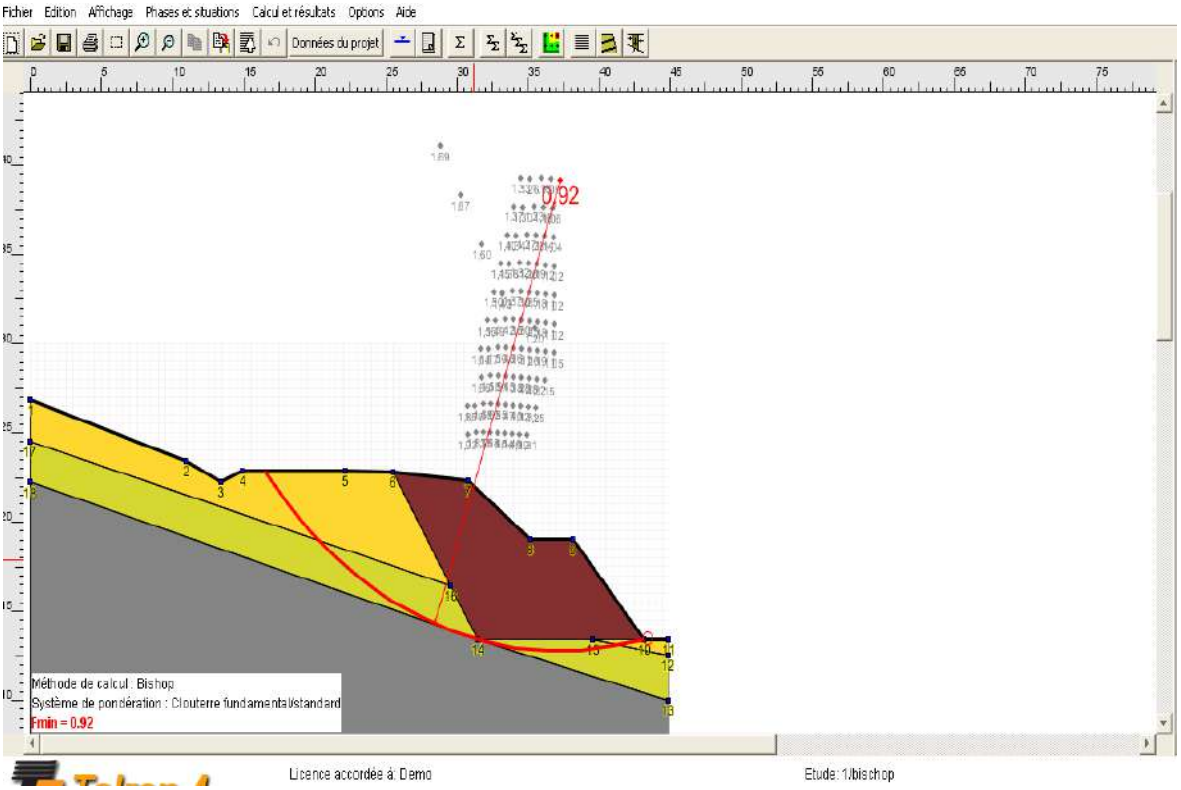


Figure III-11 : Cas d'un cercle de rupture sans renforcement.

* On obtient un coefficient de sécurité Fs = 0,92

III-15-Modélisation du talus avec renforcement (Données des essais de cisaillement) :

Dans cette partie, on est sensés recalculer le coefficient de sécurité Fs en injectant ou introduisant les propriétés du sol sableux comme étant améliorés par la présence des inclusions (armature) de renforcement géotextile. Il est donc à noter que rien d'autant n'est introduit concernant les données sur le renforcement géotextile.

a-Renforcement avec géotextile horizontal :

Cohésion, c (kPa)	Angle de frottement, φ (°)
11 ,40	33,25

Tableau III-5.les caractéristiques de sable après le renforcement horizontal.

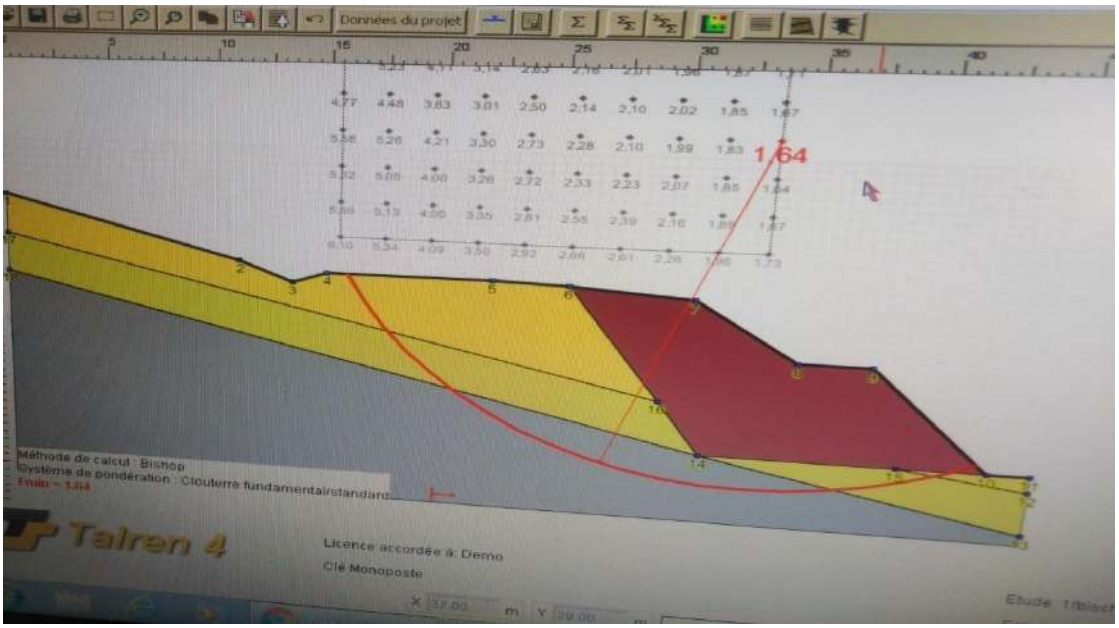


Figure III-12 : Cas d'un cercle de rupture avec renforcement horizontal.

b-Renforcement avec géotextile vertical :

Cohésion, c (kPa)	Angle de frottement, φ (°)
15.40	39.62

Tableau III-6 .les caractéristiques de sable après le renforcement vertical.

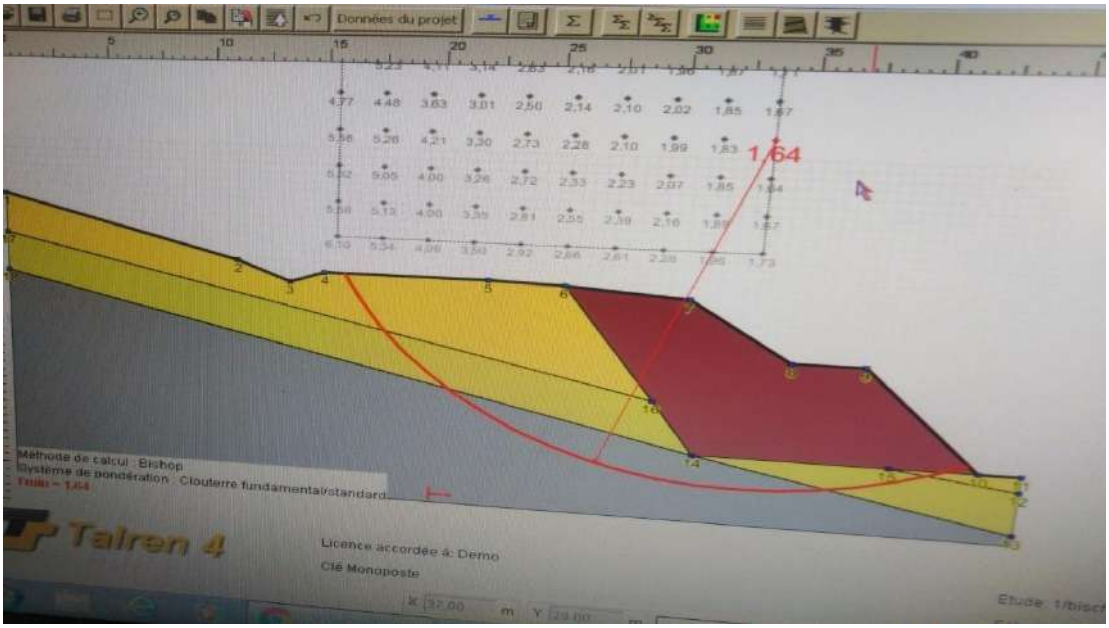


Figure III-13 : *Cas d'un cercle de rupture avec renforcement vertical.*

c-Renforcement avec géotextile incliné 45˚:

Cohésion, **c (kPa)**	Angle de frottement, φ (°)
21.88	32.91

Tableau III-7 : les caractéristiques de sable après le renforcement de 45˚.

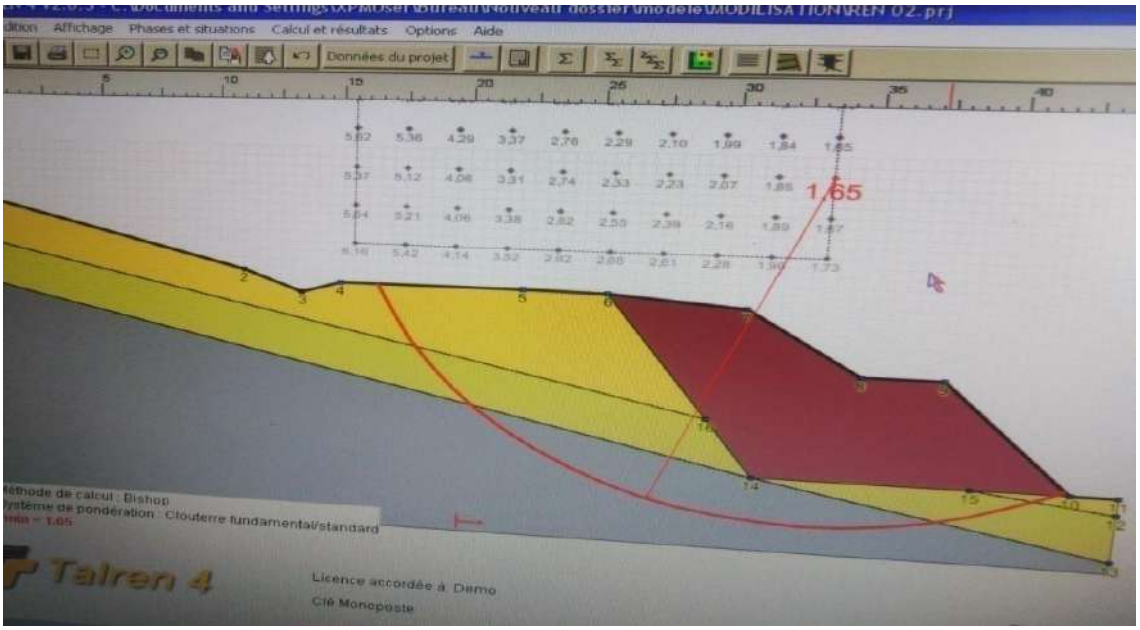


Figure III-14 : *Cas d'un cercle de rupture avec renforcement incliné 45˚*

Résultats de calculs :

Le tableau suivant montre l'influence de l'orientation de renforcement sur la stabilité du talus.

Phase / Type de talus (Méthode Bishop)	Fs
Talus sans renforcement	0.92
Talus renforcée horizontalement	1.64
Talus renforcée verticalement	1.64
Talus de renforcement incline de 45˚	1.65

Tableau III-8 : Effet de l'orientation de renforcement sur le coefficient de sécurité.

III-16–modélisation de talus après le renforcement par géotextile.

Dans cette partie, on est sensé recalculer le coefficient de sécurité Fs en injectant ou introduisant les propriétés du sol sableux et celles des inclusions géotextiles séparément, en considérant les 03 cas d'orientations de l'armature dans les massif du sol.

Sable	**C=1,73 kPa**
	φ =35,25 °
Géotextile	Résistance à la rupture : Tr = 130,8 kN/m
	Allongement à la rupture = 2 %
	Frottement sol-géotextile = 0,75

Tableau III-9: Propriétés du géotextile de renforcement

1-orientation horizontal.

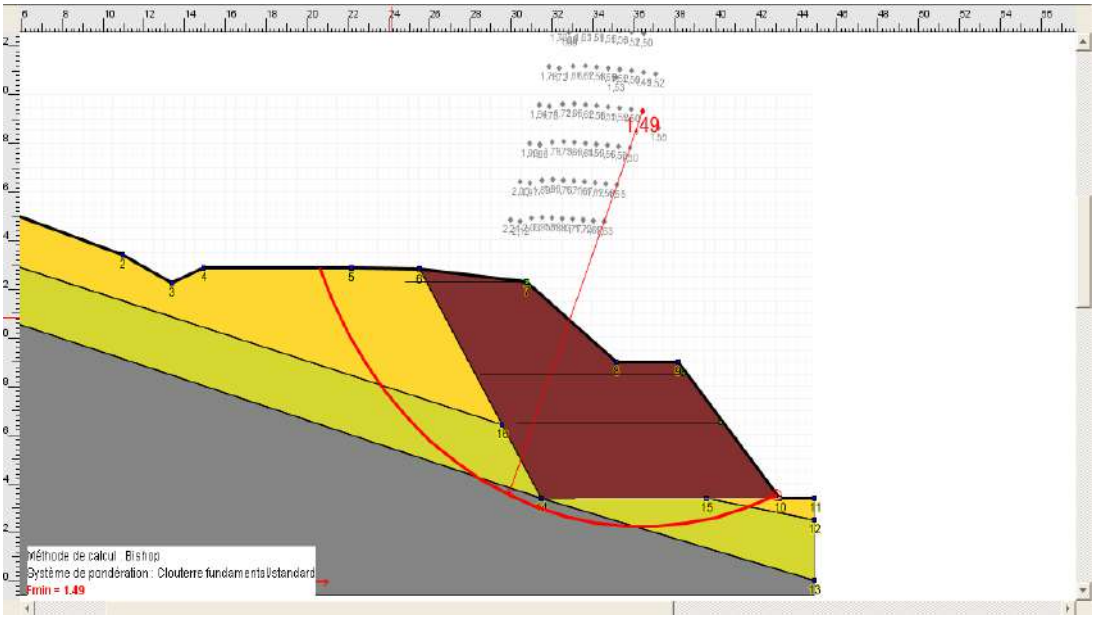


Figure III-15 : Cas d'un cercle de rupture avec renforcement horizontal.

2-Orientation vertical.

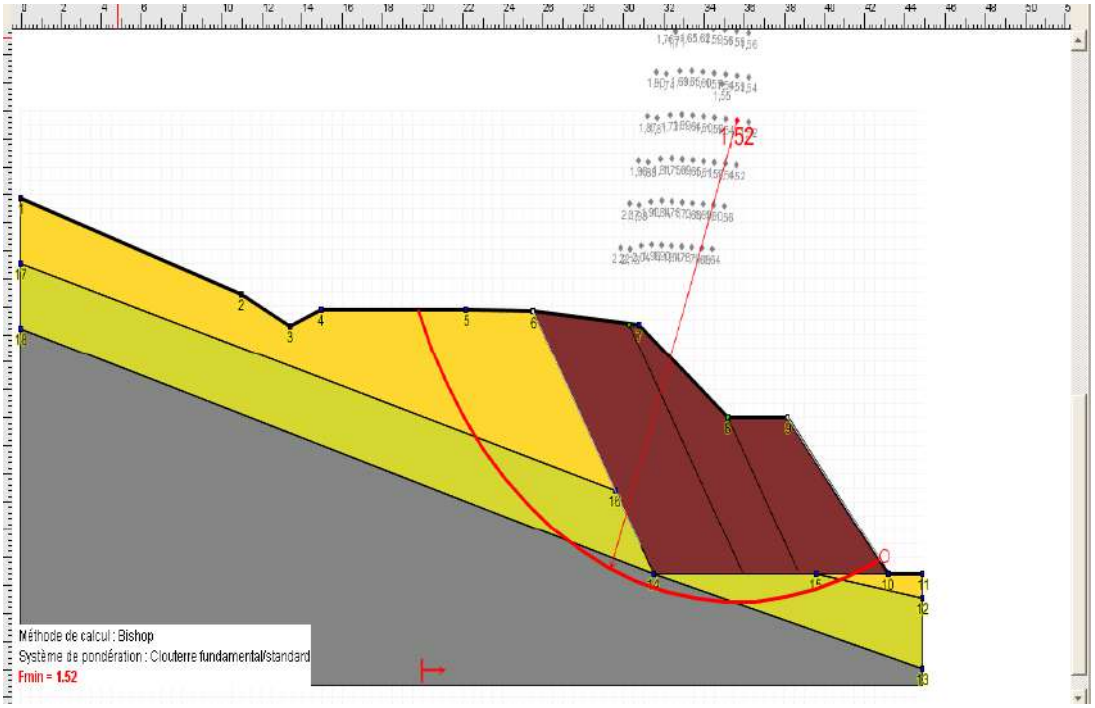


Figure III-16 : *Cas d'un cercle de rupture avec renforcement vertical.*

3-orientation incline de 45˚.

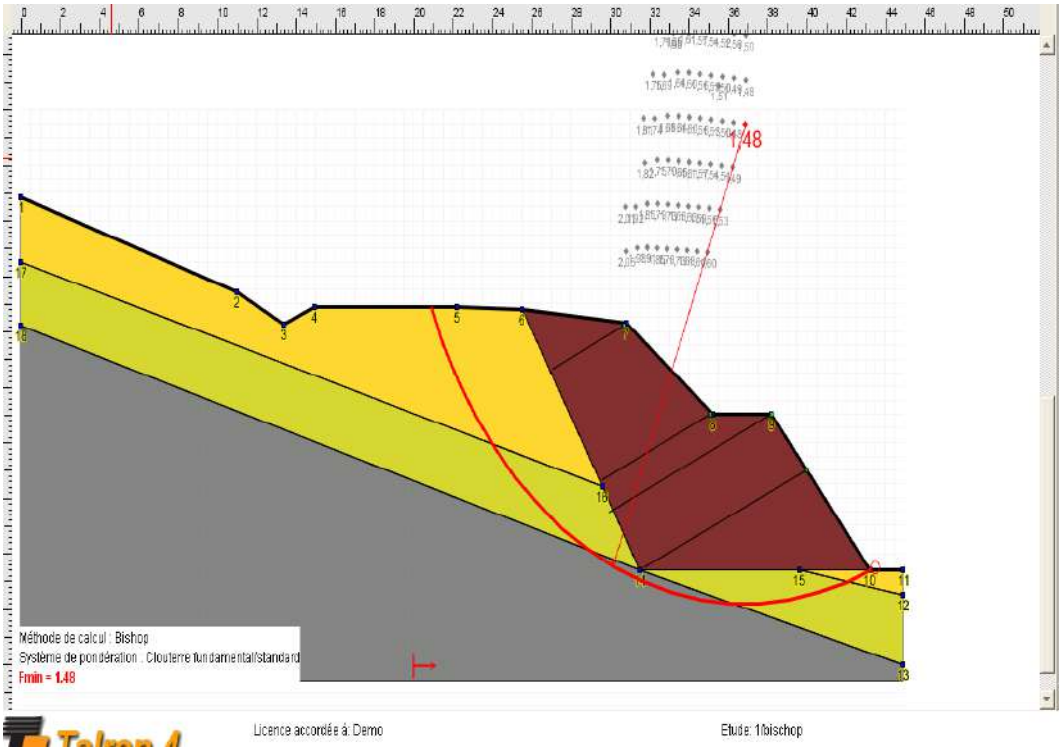


Figure III-17 : *Cas d'un cercle de rupture avec renforcement incliné 45˚*

-les résultants obtenus :

Phase /Méthode	Bishop
Talus sans renforcement	0.92
Talus renforcée horizontalement	1.49
Talus renforcée verticalement	1.52
Talus de renforcement incline de 45˚	1.48

Tableau III-10: Effet de l'orientation de renforcement sur le coefficient de sécurité.

III-17-Interprétation des résultats:

Plusieurs situations sont à discuter dans ce mémoire, relatives à deux axes de calcul : le 1er considère l'étude expérimentale de l'effet du renforcement sur les propriétés mécanique d'un sable (C≅ 0) puis l'effet de l'orientation du même renforcement ; l'étude est menée à l'aide de l'essai de cisaillement à la boite de Casagrande (Fig. III-18). Le 2ème consiste à l'étude de l'effet de l'orientation du renforcement dans le massif renforcé (Talus), utilisant les données résultats de l'essai de cisaillement à la boite , sur la valeur du coefficient de sécurité « Fs » en considérant deux sous situations : les données de cisaillement d'un sol

amélioré ($C_{am.}$ et $\varphi_{am.}$) Puis le même calcul mais avec les données du sol et du renforcement séparément (calcul classique) (Fig. III-19).

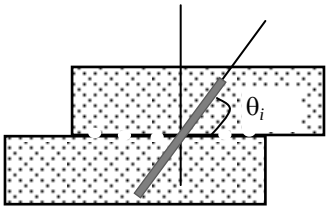


Figure III-18 : Orientation du renforcement dans boite de cisaillement

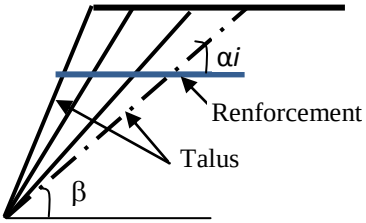


Figure III-19 : Orientation du renforcement dans le massif du sol (talus).

		Cohésion, C (kPa)	**Angle de frottement, φ (°)**
	Situation **A** : Talus sans renforcement	1,73	35,25
Situation **B** : Sol amélioré (Renforcé)	Renforcement horizontal	11,40	33,25
	Renforcement vertical	15,40	39,62
	Renforcement incliné de 45˚	21,88	32,91

Tableau III-11 : Synthèse des paramètres de cisaillement pour différentes situations (A, B).

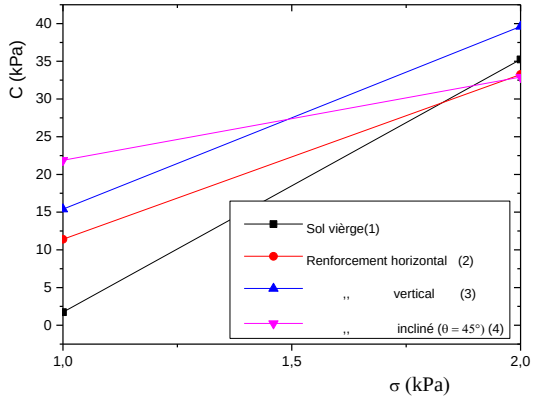


Figure III-20 : Paramètres de cisaillement déterminés à la boite de cisaillement pour différentes situation.

Phase / Type de talus (Méthode Bishop)	Fs		
	Situation A : Talus sans renforcement	Situation B : sol amélioré	Situation C : sol renforcé
Talus sans renforcement	0.92		
Talus renforcée horizontalement		1,64	1,49
Talus renforcée verticalement		1,64	1,52
Talus de renforcement incline de 45˚		1,65	1,48

Tableau III-12 : Synthèse des valeurs de Fs pour différentes situations (A. B et C).

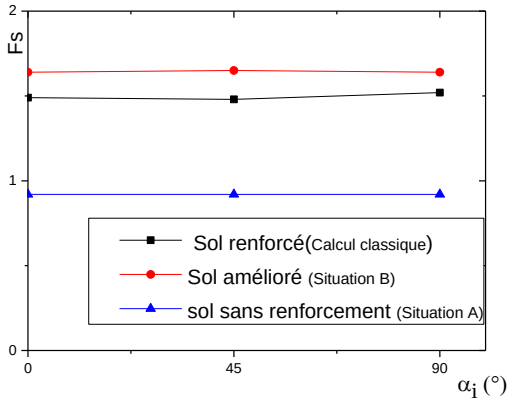


Figure III-21 : Valeurs de Fs pour différentes situations

Le coefficient de sécurité (Fs) du talus avant le renforcement est **0.92.** Avec la prise en compte de l'effet d'orientation des armatures des géotextiles d'après les essais de cisaillement le coefficient de sécurité augmenté à une valeur de **1.65**.

D'autre part le coefficient de sécurité est augmenté à **1.52** en considérant une orientation verticale et qui introduit les données du matériau renforcé comme un monolithe de propriété équivalente (sol+armature), C_{am} et φ_{am}.

L'orientation qui parait la plus optimale aboutissant à une valeur maximale égale à

1,65 correspondant à une orientation de l'armature de 45°.

Il est possible, ultérieurement de déduire une loi de régression sous la forme : $F_{sam} = F_{s0} + a.x$, Ceci nécessite des essais facultatifs et approfondie.

III-18-CONCLUSION :

L'aboutissement à la conclusion définitive sur la variante optimale à introduire dans le calcul menant à une stabilité réelle des talus renforcés s'avère encore anticipée. Néanmoins, chose certaine que la dépendance orientation du renforcement/Valeur de Fs est nettement claire en comparant la situation A, B et la situation classique. La situation A est la situation sans renforcement (Valeur de Fs, plus faible, égale 0,92).

La situation B paraît un peut grossière puisque elle donne une valeur de Fs exagérée et introduit les données de cisaillement en considérant (virtuellement) le massif renforcement un monolithe de caractéristiques équivalentes améliorés ($C_{am.}$ et $\varphi_{am)}$.

La situation C, est menée en introduisant les données du sol et du renforcement séparément ; il s'agit d'un calcul classique.

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Les glissements de terrains sont des phénomènes qui menacent leur stabilité et constituent, comme conséquences, un risque pour les infrastructures et la vie humaine. Dans la pratique, ils constituent l'une des préoccupations majeures des géotechniciens.

L'étude a commencé par l'identification et la reconnaissance mécanique d'un sol de faible résistance (sable de dunes -HASSI BAHBAH-) suivie par une étude de sont amélioration par des armatures en géotextile, tenant compte de l'effet de son orientations dans le sol. Cette étude a été menée grâce à des essais de laboratoire au cisaillement à la boite, associés à une analyse granulométrique.

Les principales conclusions qui peuvent être tirées de cette étude expérimentale sont

- les types des sols (sable HASSI BAHBAH) sont caractérisés de faible résistance ;
- les caractéristiques de cisaillement pour le sable traité vierge donnent un cisaillement faible presque nulle égale à 1,73 KPa correspondant à un angle de frottement égal 35 ,25° ;
- après amélioration l'effet de renforcement a donné une valeur de 21,88 KPa correspondant à un angle de frottement = 32 ,91 °. C'est comme si le confinement ou le renforcement affecte au sol sableux une cohésion fictive.
- l'effet de l'orientation du renforcement dans le sol est claire est significatif ; ceci est illustré à travers les valeurs des caractéristiques de cisaillement pour chaque situation d'orientation du géotextile dans la boite de cisaillement. L'effet de l'orientation du renforcement dans le talus est illustrés à travers les résultats du coefficient de sécurité pour différentes situations (talus vierge ; armature horizontale, verticale ou inclinée.

Pour un talus sans renforcement Fs, plus faible, égale 0,92 ; c'est la situation A.

- La situation B paraît un peut grossière puisque elle donne une valeur de Fs exagérée puisqu'elle introduit les données de cisaillement en considérant (virtuellement) le massif + renforcement un monolithe de caractéristiques équivalentes améliorés ($C_{am.}$ et $\square_{am.}$).

- La situation C est menée en introduisant les données du sol et du renforcement séparément ; il s'agit d'un calcul classique habituel.

La simulation relative à l'étude de la stabilité des talus, pour différentes situations a été menée, toutes, en maniant le logiciel « TALREN4 ». Elle a permis de localiser la surface du glissement critique pour différentes situations et différentes propriétés du même

sable, avant et après amélioration (renforcement).

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE……1

CHAPITRE 1 : AMELIORATION ET RENFORCEMENT DES SOL…….. 2

I-1-Introduction ……..2

I-2-définition des sols ……...2

I-3-Classification des sols : sols grenus, sols fins……3

I-4-Amélioration des sols ……4

I-4-1-Méthode d'amélioration des sols fins……5

I-4-1-1-Amélioration des sols par pré chargement ……5

I-4-1-2-Pré chargement par consolidation atmosphérique ……..6

I-4-1-4-Amélioration des sols fins par renforcement ……..7

I-Renforcement par colonnes ballastées **……7**

2-Renforcement par colonnes de sol traité à la chaux……....8

3-renforcement par congélation……9

4-Renforcement par électoconsolidation ……..9

I-4-2-Méthode d'amélioration des sols grenus …….…….....10

1-Compactage 10

1-1-Pilonnage (Consolidation dynamique, compactage dynamique)……11

2-Micropieux**……...**12

I-5-Renforcement des sols …….13

I-5-1-Introduction ……...13

I-5-2-Méthodes des renforcements des talus renforces ……13

I-5-2-1-Soutènement ……..13

1-Stabilisation Par Mur De Soutènement En Béton Armé……14
2-Renforcement Par Rideaux de Palplanches…….15
3-Renforcement Par Gabion**……..…….**16
4-Renforcement Par Soutènement en TEXSOL**……..…….**17
5-Renforcement Par Parois Cloutées……17
I-5-2-2-Renforcement ……..……17
1-Tirants d'ancrage……..17
2-le clouage…….18
2-1-Renforcement par micropieux…….**.....**19
2-2-Renforcement par pieux ……..19
3-Renforcement Par Géosynthétique…….……21
3-1-Renforcement Par Géogrille…….21
3-2- Renforcement Par Géocomposites……22
3-3-Renforcement par géotextiles **.....**23
3-3-1-Définition ……..…….……23
3-3-2- Propriétés présentation du matériau ……..24
3-3-3-Application**.....**24
3-3-4-Avantage ……..24
3-3-5-Différentes fonctions des géotextiles ……..25
I-6- Stabilité du talus renforcé ……..……26
I-6-1. Historique de la technique ……..26
I-6-2.Définition du stabilité ……..27
I-6-3- Type des ouvrages de soutènement …….……..……27
I-6-4-Les ouvrages en remblais renforcé ……..……28
I-6-4-1-Les différents types des parements……..…….29
Panneaux de pleine hauteur……..29
Panneaux de hauteur partielle……..29
Panneaux inclinés…….…….30
Jardinières…….30
Parement cellulaire……31

Parements semi-elliptiques en acier…….31
Parement treillis soudé en acier……32
Parement face enveloppée……32
Parement forme de gabions…….33
I-7-Conclusion …….34

CHAPITRE II: DISPOSITIF EXPRÉMENTAL :

II-1-Introduction……35
II-2- Matériaux utilisés ……35
Sable……..…35
Géotextile PES 150……..35
II-3-Présentation des essais ……35
1-Analyse granulométrique……..35
But de l'essai.....36
1-2-Présentation du résultant……37
2-proctor ……..……37
Résultant de l'essai……...38
3-cisaillement à la boite……39
La procédure de l'essai de cisaillement……39
Avantages et inconvénients de l'essai de cisaillement direct…….40
Avantages……40
Inconvénients……..40
3-1-description et estimation d'essai……40
Sable vierge…….41
Sable renforcé……...41
Géotextile horizontal ……...41
Géotextile vertical……41
Géotextile incline de 45˚……..41
Résultant obtenu……..42
II-4 : conclusion……45

CHAPITRE III : SIMULATION ET ÉTUDE PARAMÉTRIQUE :

A – Présentation du logiciel « TALREN4 »……..….46

III-1-Introduction……..……46

III-2-Présentation du logiciel « TALREN4 » ……46

III-3-Démarche générale d'utilisation de la nouvelle interface ……..….46

III-4 Les avantage de TALREN4……...47

III-5-Le calcul en TALREN4…… 47

Méthode de calcul…….49

Bishop……...49

III-6-Les différentes options pour la manipulation de l'interface..... 49

III-6-1- Les différentes zones à l'écran……...49

III-6-2-Le menu, les barres de boutons et le navigante Le menu principal……49

III-6-3-La barre de boutons principale……..…..50

III-6-4- Les barres de boutons contextuelles……..50

III-6-5-Barre de boutons contextuels "Données du projet"……...50

Les boutons ci-dessus correspondent dans l'ordre aux fonctions suivantes…….51

III-6-6-Barre de boutons contextuelle "Phasage/Calculs" …….51

III-8-Tableau récapitulatif des renforcements……52

III-9- Gestion du phasage…….52

III-10- Gestion du phasage……..54

B – Etude d'un cas…….....57

III-11-Données géotechniques…….57

III-12-Géométrie du modèle…….....58

III-13-Calcul du facteur de sécurité……..60

III-14-Modélisation du talus sans renforcement……..60
III-15-Modélisation du talus avec renforcement (Données des essais de cisaillement)…….……61

Renforcement avec géotextile horizontal…….…...61
Renforcement avec géotextile vertical……. …...……62
Renforcement avec géotextile incliné 45°……...62
III-16–modélisation de talus après le renforcement par géotextile à l'aide de logiciel appelé talren 4…….....63
1-orientation horizontal……64
2-Orientation vertical…….. 65

3-orientation incline de 45˚…….....66
III-17-Interprétation des résultats……..66
III-18-CONCLUSION ……..……..…70

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .

[1] : M,Bouassida. Amélioration des sol en place (Introduction à la géotechnique) : article ,january 2011)

[2] : Exposé (amélioration des sols) , Réalisée par Natacha SERTIER ,

Jean Charles BOURDEAU, Alain, Assina,

[3] : Mémoire de l'obtention du diplôme de Magistère en Génie Civil :Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols argileux de la région de chlef 2009 .

[4] : Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER : Comportement d'un remblai d'accès en sol renforce sous chargement cycliques 2015/2016.

[5] : *Mémoire pour l'obtention du diplôme de* Master : Contribution à l'étude du renforcement des talus instables par les géo synthétiques 2012.

[6] : Mémoire pour l'obtention du diplôme de master : Analyse et traitement d'un glissement de terrain sur LA CW 08 AU PK 46+300 entre médéa et beni ateli .2016/2017.

[7] : Gilles .S, Pierre .P.1998)

[8] : Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de Master : Étude d'un cas pathologique d'un tronçon de l'autoroute Est-Ouest.2014-2015.

[9] : Jean-Marc TACNET - Philippe GOTTELAND (octobre 00) Rapport d'étude *Ouvrages de protection contre les risques naturels et ouvrages en sites instables*

[10] : Vidal, H and Schlosser F., (1969) "La terre armee" Bultin de liaison du Laboratoire Central des Ponts et chaussees, Paris.

[11] : NF P 94-056 : Sols : Reconnaissance et essais, analyse granulométrique, méthode par tamisage à sec après lavage.

[12] : PROJET DE FIN D'ÉTUDES : Interprétation en contraintes effectives du comportement réversibles des matériaux granulaires compactés non – saturés sous sollicitations triaxiales cycliques , 2009 .

[13] : NF P 94-071 : Reconnaissance et essais de cisaillement rectiligne à la boite.

[14] : ***PROJET DE FIN D'ÉTUDES*** DE MASTER :Matériau terre : Etude de la résistance au cisaillement et retrait .2016-2017.

[15] : MEMOIRE DE MASTER : Contribution à la simulation au glissement de terrain cas de talus de la CW02 entre Baghlia et Naciria w . Boumrdes .